

Henri Paloste

HVDC-LAITTEISTOT

Opinnäytetyö

CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Toukokuu 2013

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö Ylivieska	Aika Toukokuu 2013	Tekijä/tekijät Henri Paloste
Koulutusohjelma Sähkötekniikka		
Työn nimi HVDC-LAITTEISTOT		
Työn ohjaaja Jari Halme		Sivumäärä 68
Työelämäohjaaja -		
<p>Opinnäytetyö tarkastelee suurjännitteistä tasasähkösiirtoa (HVDC). Tasasähköyhteyksillä käytettävät puolijohdekomponentit esitellään. Verkkokommutoivan tasasähköyhteyden rakenne ja ominaisuudet kuvataan. Jännitelähdesuuntaajilla toteutettavien tasasähköyhteyksien toteutukset ja erityispiirteet kerrotaan. Tasasähköyhteyden kaapelit esitellään. Suomen kantaverkkoon liittyvät tasasähköyhteydet kuvataan.</p>		

Asiasanat

Suurjännitteinen tasasähkösiirto, HVDC, LCC, VSC

ABSTRACT

CENTRIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES Ylivieska	Date May 2013	Author Henri Paloste
Degree programme Electrical engineer		
Name of thesis HVDC-SYSTEMS		
Instructor -		Pages 68
Supervisor Jari Halme		
<p>This thesis deals with with high high voltage direct current transmission (HVDC). Power electronic components are presented. Line commutated converters and their capabilities are studied. Voltage source converters and their special features are described. HVDC cables are presented. The DC links connected to Finnish national grid are presented.</p>		

Key words High voltage power transmission, HVDC, LCC, VSC

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

B_{SVC}	staattisen loistehon kompensattorin susceptanssi
C	kondensaattorin kapasitanssi
$\cos \emptyset$	tehokerroin
$\cos \emptyset_i$	vaihtosuuntaajan tehokerroin
$\cos \emptyset_r$	tasasuuntaajan tehokerroin
f	taajuus
I_A	tyristorin anodivirta
i_c	kommutointivirta
I_d	tasasähköpuolen virta
I_G	tyristorin hilavirta
I_h	tyristorin kriittisen rajan virta
I_K	tyristorin katodivirta
I_{MAP}	virta suurimmalla mahdollisella teholla
I_n	harmonisen yliaaltovirran tehollisarvo
i_Y	tähteen kytketyn muuntajan toision virran hetkellisarvo
i_Δ	kolmioon kytketyn muuntajan toision virran hetkellisarvo
j	imaginääriosan kerroin
k	kokonaisluku
m	suuntaajamuuntajan muuntosuhde (U_1 / U_2)
MAP	suurin saatavissa oleva teho
MPC	maksimitehokäyrä

n	harmonisten yliaaltojen järjestysluku
P	pätöteho
P_{di}	vaihtosuuntaajan teho
P_{dr}	tasasuuntaajan teho
Q	loisteho
R_L	tasasähköpiirin resistanssi
STATCOM	staattinen synkronikompensaattori
SVC	staattinen loistehon kompensaattori
$\tan \varnothing$	loistehon kulma
THFF	puhelinyliaaltojen häiriökerroin
TIF	puhelinhäiriökerroin
U	vaihtosähköpuolen pääjännitteen tehollisarvo
U_1	suuntaajamuuntajan ensiöpuolen pääjännite
U_2	suuntaajamuuntajan toisiopuolen pääjännite
U_{doi}	ohjaamattoman 6-pulssisen vaihtosuuntaajasillan perusyhtälön ideaalinen tasajännite
U_{dor}	ohjaamattoman 6-pulssisen tasasuuntaajan perusyhtälön ideaalinen tasajännite
U_{dor12}	ohjaamattoman 12-pulssisen tasasuuntaajan perusyhtälön ideaalinen tasajännite
U_{di}	ohjatun 6-pulssisen vaihtosuuntaajasillan tasajännite, jossa kommutointikulma huomioitu
U_{dr}	ohjatun 6-pulssisen tasasuuntaajan tasajännite, jossa kommutointikulma huomioitu

U_{dr12}	12-pulssisen tasasuuntaajan todellinen tasajännite, jossa kommutointireaktanssin vaikutus huomioitu
U_{dri}	tasasuuntaajan ideaalinen tyhjäkäyntitasajännite
U_n	harmonisen yliaaltojännitteen tehollisarvo
V_{AD}	tyristorin vastasuuntainen jännite (Amerikkalainen merkintätapa)
X_{ss}	lähdereaktanssi
X_c	kommutointireaktanssi
\underline{I}_{SVC}	staattisen loistehon kompensattorin virtavektori
\underline{U}_{SVC}	staattisen loistehon kompensattorin jännitevektori
$\underline{U}_{STATCOM}$	staattisen synkronikompensaattorin jännitevektori
ΔI_d	virtojen erotus
α	ohjauskulma
γ	sammutuskulma
γ_{min}	minimisammutuskulma
μ	kommutointikulma
ω	kulmataajuus

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS**

1	JOHDANTO	1
2	TASASÄHKÖYHTEYDET TEHONSIIRROSSA	2
3	TEHOELEKTRONIIKAN KOMPONENTIT	5
3.1	Tyristori	5
3.2	Valolla ohjattu tyristori	7
3.3	IGBT	8
3.4	GTO -tyristori	9
4	VERKKOKOMMUTOIVA TASASÄHKÖYHTEYS	10
4.1	Tyristoriventtiilit	13
4.2	Suuntaajamuuntaja	14
4.3	Tasoituskuristin	16
4.4	Tasa- ja vaihtosuuntaus tyristorisillalla	18
4.4.1	Kommutointijännite ja kommutointireaktanssi	21
4.4.2	Kommutointi	22
4.4.3	Todellinen tasa- ja vaihtosuuntaaja	23
4.4.4	Loisteho	28
4.4.5	Yliaallot	30
4.5	Tehon säätäminen	37
4.5.1	Vakiotehosäätö	38
4.5.2	Vakiovirtasäätö	39
4.5.3	Hätätehonsäätö	40
4.5.4	Maksimiteho	41
4.6	Yliaaltojen suodatus	42
4.6.1	Vaihtosähköpuolen yliaaltojen suodatus	44
4.6.2	Tasasähköpuolen yliaaltojen suodatus	45
4.6.3	Aktiivinen yliaaltosuodatin	45
4.7	Loistehon kompensointi	47
4.7.1	Staattinen loistehon kompensattori	47
4.7.2	STATCOM	48
4.7.3	Kondensaattorikommutoidut suuntaajat	49

4.8	Tasasähköyhteydet	50
4.8.1	Back-to-back -yhteys	50
4.8.2	Monopolaarinen yhteys	51
4.8.3	Bipolaarinen yhteys	52
5	TASASÄHKÖYHTEYS JÄNNITELÄHDESUUNTAAJALLA	54
5.1	2-tasoinen pulssinleveysmodulaatio	55
5.2	Modulaarinen monitasosuuntaus	56
5.3	Yhteyden ominaisuudet	57
6	TASASÄHKÖYHTEYDEN SIIRTOKAAPELIT	59
7	SUOMEN TASASÄHKÖYHTEYDET	62
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	66
	LÄHTEET	67

1 JOHDANTO

Suurjännitteisiä tasasähköyhteyksiä, englanniksi high voltage direct current transmission (HVDC) käytetään tehonsiirtoon vaihtosähköverkkojen välillä. HVDC-laitteistoja käytetään tasasuuntaamiseen ja vaihtosuuntaamiseen yhteyden päissä. Vaihtosähkön tasasähköksi muuttamista sanotaan tasasuuntaamiseksi ja tasasähkön vaihtosähköksi muuttamista vaihtosuuntaamiseksi. Tasasähköyhteyksiä käytetään, koska se on käytännössä ainoa keino yhdistää eritaajuisia sähköverkoja ja säätää siirrettävää tehoa näiden välillä. Eri maiden välisiin yhteyksiin tasasähkö onkin hyvä vaihtoehto. Maiden välisillä yhteyksillä voidaan parantaa sähköverkkojen stabiilisuutta ja tuoda sähköä muualta. Asia koskettaa jokaista suomalaista, vaikka asiaa ei arkipäiväisissä toimissa millään tavalla huomaakaan. Tasasähköyhteys voidaan varustaa verkkokommutoivalla suuntaajalla tai jännitelähdesuuntaajalla. Molemmissa tekniikoissa on omat hyvät ja huonot puolensa. Verkkokommutoivassa suuntaajassa käytetään tyristorisiltoja suuntaamiseen. Jännitelähdesuuntaajassa jännite suunnataan puolijohdekytkimien ja kondensaattorien avulla.

Nämä tekniikat eroavat myös siinä, että jännitelähdesuuntaajassa jännitteen napaisuus pysyy samana ja virran suuntaa muuttamalla voidaan tehon suunta kääntää. Verkkokommutoidussa suuntaajassa virran suunta pysyy samana ja jännitteen napaisuutta muuttamalla voidaan tehon suunta kääntää.

Jännitelähdesuuntaajatekniikka on kehittynyt 2000-luvun alusta paljon ja tullut vartenotettavaksi vaihtoehdoksi verkkokommutoivalle suuntaajatekniikalle. Verkkokommutoidun suuntaajan tehonkesto on vielä suurempi ja häviöt pienemmät, mutta sen vaatimukset vahvaan verkkoon liittämistä voivat joskus kallistaa valinnan jännitelähdesuuntaajaan. Erityisesti jos siirrettävät tehot eivät ole kovin suuria.

2 TASASÄHKÖYHTEYDET TEHONSIIRROSSA

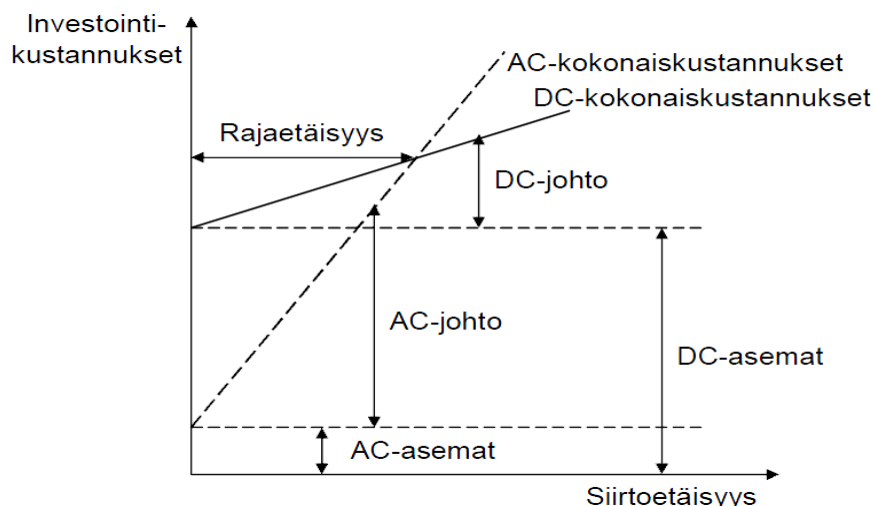
Tasasähkön hyödyntäminen tehon siirrossa on kasvanut rajusti viimeiset vuosikymmenet. Tämä johtuu tehopuolijohteiden tehonkeston kasvusta. Vaihtosähkö on yleisin tapa tehon siirtämisessä. Vaihtosähkössä on kuitenkin monia haittapuolia, joita tasasähkön hyödyntämisessä ei ole. Tehon siirtämistä vaihtosähköllä rajaa johtimien kuumeneminen ja käytön varmuus. Sen sijaan tasasähköllä siirtoteho riippuu halutusta jännitteen tasosta ja laitteistojen kuumuuden kestävyydestä. (Elovaara ja Haarla 2011, 297-298.)

Tasasähköyhteyden siirtokaapelit eivät kuluta loistehoa. Tästä syystä niillä ei ole jännite- tai kulmavakauden kanssa ongelmia. Tehoa on mahdollista muuttaa nopeasti. Tämän vuoksi sitä pystytään hyödyntämään taajuuden säätämisessä ja häiriön aikaisena tehoreservinä. Olettaen kuitenkin, että yhteys yhdistää kaksi eri sähköverkkoa. Suuntaaja-asema on oltava tasasähköyhteyden molemmissa päissä. Asemalla vaihtosähkö muutetaan tasasähköksi ja toisella asemalla tasasähkö vaihtosähköksi. Tasasähköyhteys voidaan toteuttaa kahdella eri tekniikalla. Näitä ovat itsekommutoiva jännitelähdesuuntaaja ja verkkokommutoiva suuntaaja. Napaisuus ei voi vaihtua jännitelähdesuuntaavalla tasasähköyhteydellä ja virta kulkee aina samaan suuntaan verkkokommutoivalla tasasähköyhteydellä. Mahdollisuus silmukoida verkkoja on etu vaihtosähkön hyödyntämisessä ja sähköasemia pystytään helposti asentamaan yhteyden väliin. Tasasähköyhteydellä se on todella vaikeaa ja hintavaa. Rajoituksena on myös tasavirtakatkaisijan puute isoille tehoille. (Elovaara ja Haarla 2011, 298-299,301.)

Tasasähkön käyttäminen on ainoa keino yhdistettäessä verkkoja, joiden taajuuden säätäminen on erilainen tai nimellistaajuus ei ole sama. Saman taajuisiakaan sähköverkkoja ei pystytä eräissä tapauksissa yhdistämään vaihtosähköä hyödyntämällä. Näitä tapauksia voivat olla erilaisella taajuuden säätämällä toimivat sähköverkot, ne saattavat olla kovinkin erikokoisia tai erittäin suurikokoisia, jolloin verkkoja yhdistävä johto ylikuormittuisi liian paljon kuormien heilahteluiden takia. Vaihtosähköllä johdon pidentyessä vakauden määräämä pätötehon siirtomäärä laskee. Vaihtosähköjohdolla syntyy kapasitiivista varausvirtaa ja se laskee siirrettävän virran määrää. Esimerkiksi varausvirta voi kuluttaa koko johtimen virran siirtämisen kapasiteetin suurilla matkoilla. Siirtomatkaa on kuitenkin mahdollista kasvattaa. Keinoja ovat esimerkiksi sarjakompensointi, asemien rakentaminen yhteyden välille ja lisäämällä johtimia. Siirtomatkan kasvaessa se tulisi

jossakin vaiheessa kuitenkin kalliimmaksi kuin tasasähköllä siirtäminen. Esimerkiksi koko vaihtosähköjohtimen kapasiteetti menee varausvirran kuljettamiseen 70–80 km matkalla 400 kV jännitteellä ilman kompensointia. Pienemmille jännitteille tarkoitetuilla kaapeleilla ongelma ei ole niin iso, koska pienemmillä kaapeleilla kapasitanssi ei ole yhtä suuri. Tämä johtuu siitä, että loistehon tuottaminen on suhteessa neliölliseen jännitteeseen. Tasasähkön käyttäminen merien alittamiseen on oiva keino, koska loistehoa ei voida kompensoida siirtotien välissä. (Elovaara ja Haarla 2011, 301-302.)

Vaihtosähköasemat ovat halvempia kuin suuntaaja-asemat. Tasasähkön siirtoon tarkoitetut Johdot ovat kuitenkin rakentamisen kustannuksiltaan halvempia. Tasasähköllä siirrettäessä tullaan toimeen kahdella johtimella. Vaihtosähköllä siirrettäessä on aina minimissään kolme johdinta. Laskennallisesti näillä johtimilla siirtyvä teho on kuitenkin yhtä suuri, kun tehokerroin vaihtosähköllä olisi suuruusluokkaa 0,94. Näistä pystytään päättämään, että tasasähkön käyttäminen on halvempaa suurilla siirtomatkoilla ja vaihtosähkön käyttäminen halvempaa pienemmillä matkoilla. Vertailtaessa näitä kahta tasasähköllä siirtäminen alkaisi olla kannattavampaa siirtoetäisyyden ollessa 600–800 km, kun käytetään ilmajohtoja. Siirtomatka ei vaikuta tasasähköllä siirrettäessä suuntaaja-aseman tehohäviöihin. Vaihtosähköllä siirrettäessä sillä taas olisi vaikutusta. Havaittavat häviöiden aiheuttajat suuntaaja-asemilla ovat suuntaajakomponenttien sammutuksesta ja kytkennästä johtuvat häviöt. Jännitelähdesuuntaajatekniikkaa käyttävän aseman tehohäviöt riippuvat hyödynnetystä tekniikasta, mutta ne ovat aina isommat kuin verkkokommutoivaa tekniikka käytettäessä. Jännitelähdesuuntaajatekniikka on vielä tuore teknologia. Niitä on alettu käyttämään suurten tehojen siirrossa 2000-luvun alusta. Isotehoisin jännitelähdetekniikalla tehty tasasähkön siirtoyhteys on ollut vuonna 2008 teholtaan 500 MW ja jännitteeltään ± 200 kV. Verkkokommutoivalla tekniikalla toteutettu isotehoisin yhteys on ollut 3000 MW ja jännitteeltään ± 800 kV. Suuntaaja-aseman tehohäviöt siirretystä tehosta ovat verkkokommutoivalla tekniikalla noin 0,8 %. 2-tasoisella pulssinleveysmodulaatiolla toteutetun jännitelähdesuuntaajatekniikkaa käyttävän aseman kaikki tehohäviöt suurimmalla teholla käytettäessä on 1,6 %. Modulaarista monitasotekniikka hyödyntävän aseman tehohäviöt yhteydestä ovat 1,4 %. Siirtojohdon tehohäviöitä on vaikea vertailla, koska ne riippuvat johtojen koosta ja käytetystä määrästä. (Elovaara ja Haarla 2011, 299-301, 305.)



KUVIO 1. Investointikustannukset siirtoetäisyyden funktiona. (Partanen 2011.)

Kuviosta 1 nähdään, että pitkällä siirtoetäisyyksillä tasasähköyhteys on halvempi. Vaihtosähköllä johdon kustannukset vaikuttavat voimakkaammin pituuden kasvaessa. Etuja verkkokommutoivalla tekniikalla toteutetulla tasasähköyhteydellä ovat:

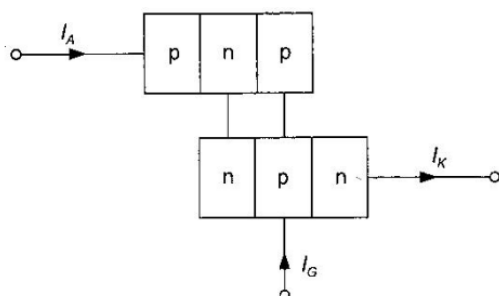
1. Erittaajuiset vaihtosähköverkot voidaan yhdistää.
2. Johdot pystytään kuormittamaan taloudellisesti.
3. Yhtäläisen taajuuden omaavat vaihtosähköverkot voidaan yhdistää asynkronisesti.
4. Kapasitiivista varausvirtaa ei ole.
5. Tehon säätäminen on nopeaa.
6. Vaihesiirto ja taajuus eivät vaikuta siirrettävään tehoon.
7. Vakiovirtasäädöllä yhteys ei suurennakaan oikosulkuvirtoja vaihtosähköverkossa.
8. Virran paluutienä pystytään käyttämään maata tai merta. (Partanen 2011, 23-24.)

Haittoja sen sijaan ovat:

1. Asemat ovat mutkikkaampia ja kalliimpia.
2. Suuntaaminen aiheuttaa yliaaltoja.
3. Suuntaaja-asema kuluttaa loistehoa.
4. Tasavirran katkaiseminen on vaikeaa.
5. Korroosiota aiheutuu metalliesineissä käytettäessä maata virran paluutienä.
6. Merikaapeli voi aiheuttaa kompassihäiriöitä. (Partanen 2011, 32.)

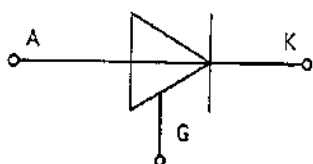
3 TEHOELEKTRONIIKAN KOMPONENTIT

3.1 Tyristori



KUVIO 2. Tyristori (Arrillaga 1998.)

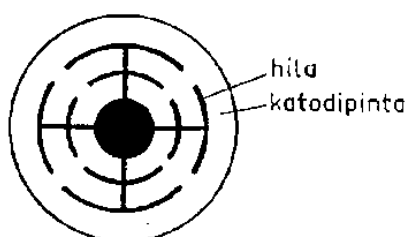
Tyristori on pohjimmiltaan kaksi yhteen liitettyä transistoria. Tyristori kuvataan nelikerroksisena komponenttina. Siinä on kolme rajapintaa ja sen toiminta perustuu transistorien regeneratiiviseen toimintaan. Kuviossa 2 on kuvattu anodivirta (I_A), katodivirta (I_K) ja hilavirta (I_G). (Arrillaga 1998, 4-5.)



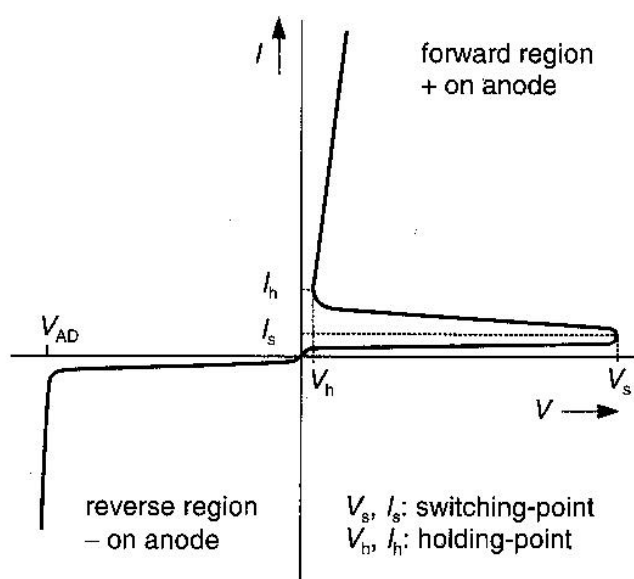
KUVIO 3. Tyristorin piirrosmerkki (Niiranen 1998.)

Kuviossa 3 on esitetty tyristorin piirrosmerkki. Tyristori voidaan sytyttää hilalle annettavalla virtapulssilla. Tyristorin kuumenemisen takia sille on asetettu suurin virran nousunopeuden arvo. Sen paikallisen lämpenemän täytyisi olla aina alle 600 Celsius astetta. Tästä syystä tyristorin rakenteesta riippuu sen nousunopeuden kestävyys. Virran johtaminen lähtee läheltä hilan reunaa, joten virran nousunopeuden suurentamiseksi on venytetty sen reunaa. Näin saadaan kasvatettua johtavaa aluetta, jonka hilapulssi on

aiheuttanut. Tämän vuoksi sormihila on oivallinen rakenne isovirtaisille ja nopeille tyristoreille. Kuviossa 4 on esitetty eräs sormihilarakenne. Virta syttymistä varten täytyy olla isompi hilan laajemman kehän takia. Virran kestävyyttä kuitenkin rajoittaa sormihilan iso pinta-ala komponentin päällä, joka on voitu ohittaa vahvistetulla hilan rakenteella. (Niiranen 1998, 12, 45-46.)

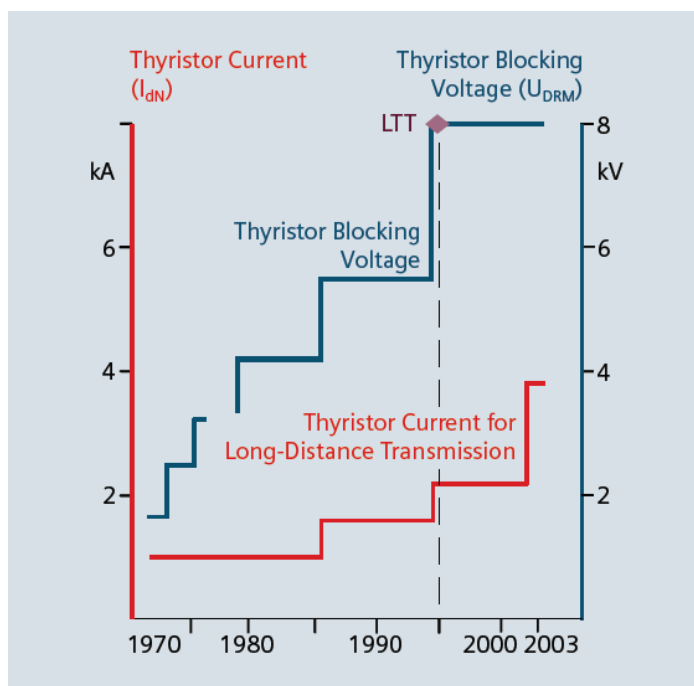


KUVIO 4. Sormihilarakenne. (Niiranen 1998.)



KUVIO 5. Tyristorin toiminta (Arrillaga 1998.)

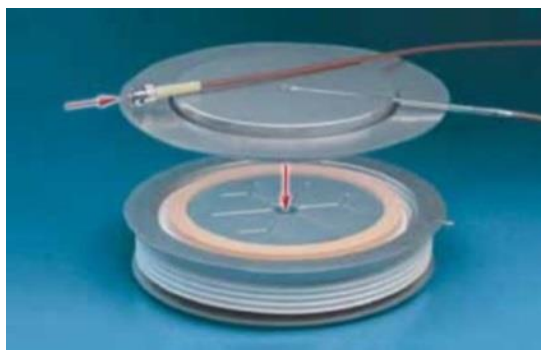
Jännitteen ja virran käyttäytyminen voidaan nähdä kuviosta 5. Myötäsuuntainen tyristori voidaan saattaa korkean impedanssin tilasta matalaan pienen hilavirran avulla. Tyristori voi kuitenkin tuhoutua liian suuresta jatkuvasta ylivirrasta, vastasuuntaisesta jännitteestä (V_{AD}) tai liian nopeista virran muutoksista. Tyristori on mahdollista sammuttaa vain laskemalla päävirtapiirin virtaa alle kriittisen rajan (I_h). (Arrillaga 1998, 5.)



KUVIO 6. Tyristorien estojännitteen ja myötävirranteen kehitys (Siemens AG 2011.)

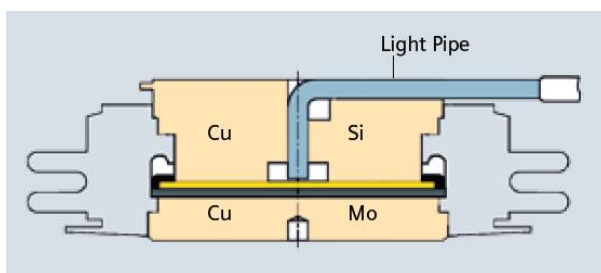
Korkealaatuiset tyristorit, joita käytetään nykypäivän HVDC -laitoksissa kestävät jopa 8 kV estosuunnan jännitettä ja 4 kA tasavirtaa. Vaadittu jännitteenkesto voidaan saavuttaa kytkemällä tarpeellinen määrä tyristoreita sarjaan. Korkean tasavirranteen ansiosta tyristoreita ei ole kuitenkaan enää tarvetta kytkeä rinnakkain. (Siemens AG 2011, 16.)

3.2 Valolla ohjattu tyristori



KUVIO 7. Valolla ohjattu tyristori. (Siemens AG 2011.)

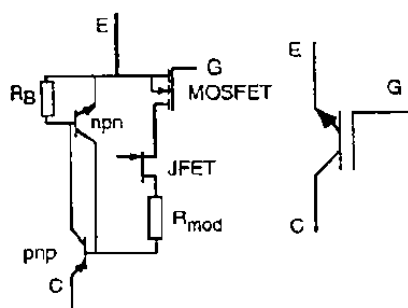
Valolla ohjattua tyristoria, englanniksi light-triggered thyristor (LTT) ohjataan johtavaksi fotoneilla elektronien sijaan. Siemensin mukaan jopa 80 %:n säästö tyristoriventtiilin komponenteissa voidaan saavuttaa tämän teknologian käytöllä. Valolla ohjatut tyristorit integroidulla ylijännitesuojalla on Siemensin standardi ja todistettu teknologia. (Siemens AG 2011, 16.)



KUVIO 8. Valolla ohjatun tyristorin rakenne. Cu = kupari, Si = pii, Mo = molybdeeni. (Siemens AG 2011.)

ABB on päässyt suurempiin tehoihin perinteisillä elektronisesti ohjatuilla tyristoreilla. ABB onkin todennut valolla ohjattavien tyristorien teknologian olevan umpikuja ja jatkavansa elektronisesti ohjattavien tyristorien kehittämistä. (ABB 2005)

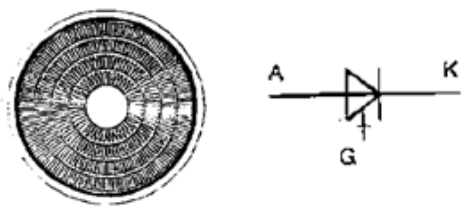
3.3 IGBT



KUVIO 9. IGB – transistorin piirikaavio ja piirrosmerkki (Niiranen 1998.)

Eristetyllä hilalla varustettu transistori, englanniksi insulated gate bipolar transistor (IGBT) on puolijohdekomponentti, jota voidaan käyttää virran ohjaukseen. Vuonna 1997 virtakestoltaan isoimmat ovat olleet 1200 A ja jännitteen kestävydeltään 3300 V. Kuviossa 9 on esitetty transistorin sijaiskytkentä, josta voidaan havaita, että diodin käyttäminen siltakytkennöissä on pakollista. Bipolaaritransistorilla kun ei ole sisäistä diodia. Tällöin transistorin sisäisen diodin jännitekestoisuuden alenemisen aiheuttaneesta takavirrasta on voitu päästä eroon. Etuna tässä on tietenkin se että, transistorin ominaisuuksista ei ole tarvetta tinkiä, koska ulkoisen diodin piirteet ovat vapaasti valittavissa. (Niiranen 1998, 99-100.)

3.4 GTO -tyristori

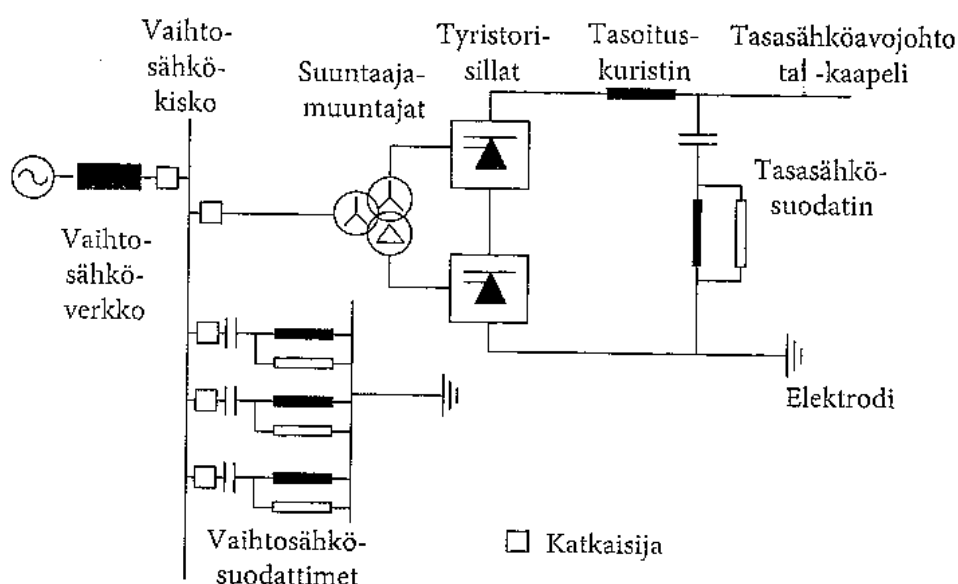


KUVIO 10. GTO -tyristorikiekko katodipuolelta ja piirrosmerkki. (Niiranen 1998.)

Hilalta ohjattu tyristori, englanniksi gate turn off (GTO) eroaa tavallisesta tyristorista siten, että se voidaan sammuttaa syöttämällä hilalle suuri negatiivinen virta. GTO -tyristorin ominaisuudet tavalliseen tyristoriin verrattuna ovat vielä huonot ja eivät siksi ole vielä lyöneet läpi. Tyristorin ja GTO -tyristorin rakenne ovat muuten hyvin samankaltaiset. (Arrillaga 1998, 7.)

4 VERKKOKOMMUTOIVA TASASÄHKÖYHTEYS

Verkkokommutoivan tasasähköyhteyden, englanniksi line commutated converter (LCC) tyypillinen periaatekaavio tällaisesta laitteistosta on esitetty kuviossa 11. Verkkokommutoivalla tekniikalla toimivassa tasasähköyhteydessä tasa- ja vaihtosuuntaus toteutetaan tyristoriventtiileillä. Verkkokommutoivalla tasasähköyhteydellä virran suunta on aina vakio. Tehon suunta on mahdollista kääntää vain vaihtamalla molemmalla suuntaaja-asemalla jännitteen polariteettia. Suuntaaja-asemien välistä jännite-eroa muuttamalla voidaan säätää siirtyvää virtaa ja tehoa halutuksi. Jännitteen avulla tehoa ei kuitenkaan pystytä ohjaamaan, koska sen pienikin muutos voi tuplata siirrettävän tehon. Verkkokommutoiva suuntaaja vaatii riittävästi oikosulkutehoa toimiakseen. Oikosulkutehon lisäämiseen on kuitenkin keinoja. Voidaan käyttää esimerkiksi synkronikompensoattoria. Yleisin suuntaaja-aseman laitteisto muodostuu vaihtosähkökiskosta, vaihtosähkösuodattimista, suuntaajamuuntajista, tyristorisilloista, tasoituskuristin, tasasähkösuodatin, elektrodi ja johdosta. Laitteistolla on oltava myös säätöjärjestelmä ohjaamassa toimintaa. (Elovaara ja Haarla 2011, 298,308-309.)

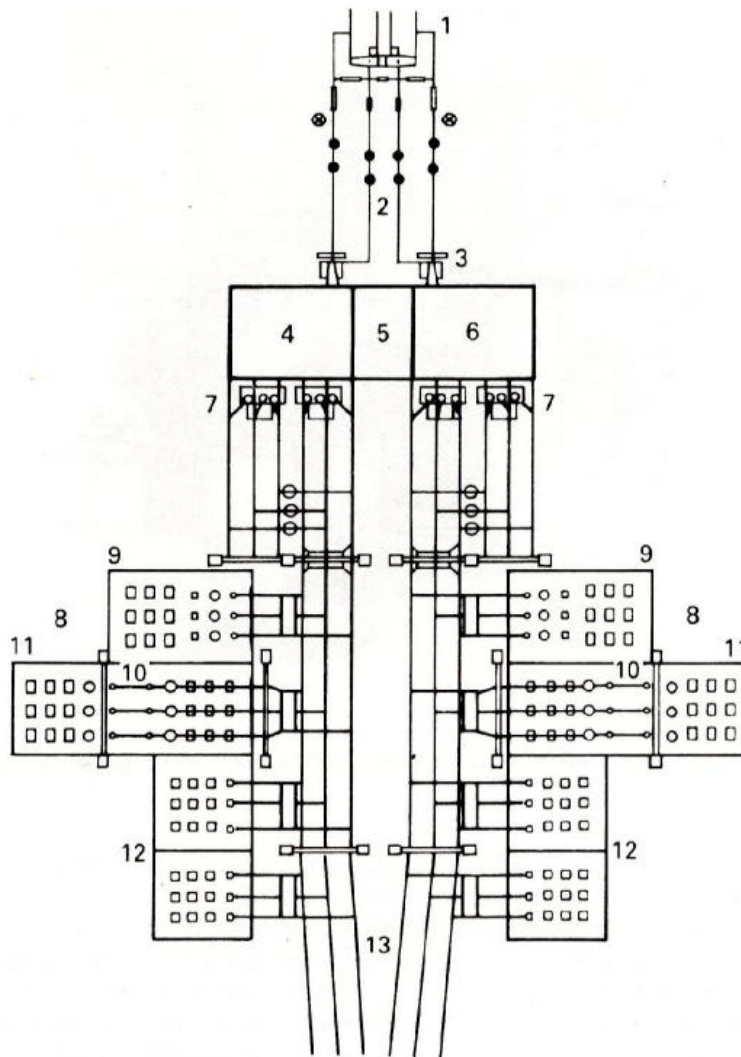


KUVIO 11. Periaatekaavio verkkokommutoidusta suuntaaja-asemasta (Elovaara ja Haarla 2011.)

Kuviossa 11 on kolmikäämitysmuuntaja kytketty niin, että kahdesta 6-pulssisillasta on tehty 12-pulssisilta. Suuntaajamuuntajina voidaan käyttää esimerkiksi kahta suuntaajamuuntajaa erikseen tai kolmikäämitysmuuntajaa. Suuntaajamuuntajakytkenät ovat tähti-tähti (Yy) ja tähti-kolmio (Yd). Kolmikäämitysmuuntajassa on yksi ensiökäämi ja kaksi toisiokäämiä. Käytäntö on osoittanut, että paras rakenne tasasuuntaajalle on 12-pulssinen silta. Vaihtosähköverkon jännite muuttuu, joten tasajännite säilytetään säädetyssä arvossa ohjauskulmalla α ja muuntajien käämikytkimillä. Käämikytkintä käytetään hitaissa vaihtosähköpuolen jännitteen vaihteluissa ja jatkuvassa toimintatilassa. Nopeissa vaihtosähköpuolen jännitteen heilahteluissa muutetaan sillan ohjauskulmaa. Joitakin dynaamisia toimintoja on mahdollista toteuttaa ohjauskulmalla. (Elovaara ja Haarla 2011, 308-311).

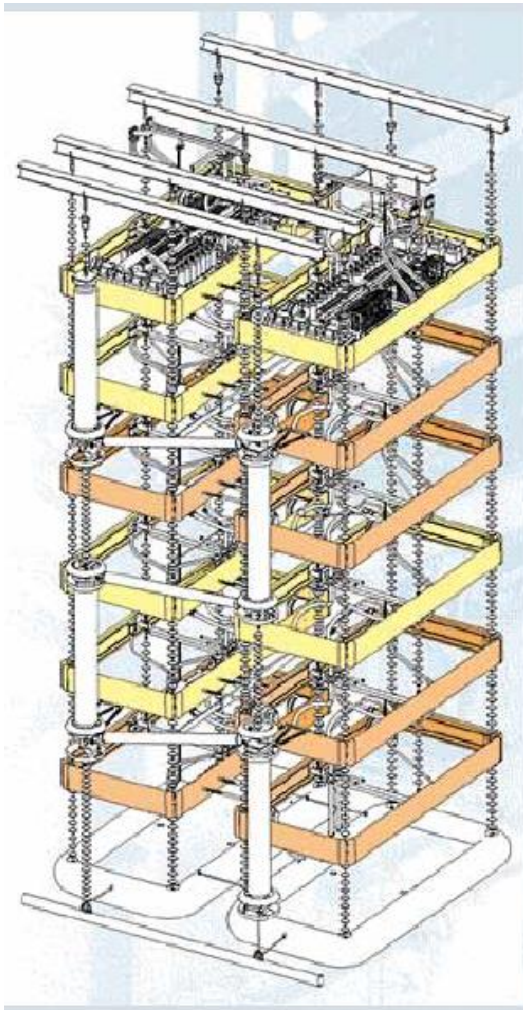
Suuntaajasilta kuluttaa loistehoa. Suuntaajan jännitettä pyritään aina muuttamaan suuntaajamuuntajan käämikytkimellä, koska ohjauskulman kasvaessa myös loistehon kulutus kasvaisi. Loistehoa täytyy kompensoida, että vaihtosähköpuolen jännite ei alentuisi liian paljon. Yleisin keino kompensoida loistehoa on käyttää rinnakkaisia kondensaattoreita ja staattisia kondensaattoreita. Rinnakkaisilla kondensaattoreilla kompensoitaessa niitä voidaan kytkeä käyttöön loistehon kulutuksen mukaisesti. Tyristorisilta tuottaa jänniteyliaaltoja tasasähköpuolelle ja virtayliaaltoja vaihtojänniteverkkoon. Asemalla on aina yliaaltosuodattimet tästä syystä. Yliaaltosuodattimet voivat auttaa loistehon kompensoinnissa, koska loistehon kulutus ja yliaallot kasvavat yhtä aikaa. Molemmat kuitenkin kasvavat pätötehon siirron suurentuessa. Tasasähköpuolen tasoituskuristimen tehtävä on tasata suuntaajasillan aiheuttama sykkeinen tasavirta. Lisäksi se estää vikavirran liian nopeaa kasvua kommutointihäiriöissä ja tasasähköjohdon vioissa. Tasasähköyhteydestä voi aiheutua yliaaltoja tasasähköpuolelle, jotka saattavat aiheuttaa viestiliikenteen häiriöitä. Häiriöt suodatetaan tasasähkösuodattimella. Sitä ei ehkä tarvita, jos koko yhteys on toteutettu kaapelilla. (Elovaara ja Haarla 2011, 309-310.)

Kuviossa 12 on esitetty verkkokommutoivan suuntaaja-aseman kaavio ja siitä nähdään laitteistojen tilankulutus, sekä niiden sijoittaminen asemalla. Voidaan havaita, että Suodatuslaitteistot ovat suurin tilanviejä. Venttiilisali ja ohjaustilat eivät juuri vie tilaa. (Li 2008, 15.)



KUVIO 12. Kaavio bipolaariyhteyden suuntaaja-asemasta. 1. Tasajännitelinjat, 2. Tasajännitekytkinkenttä, 3. tasoituskuristimet, 4. venttiilisali ja napa 1, 5. huoltorakennus, 6. venttiilisali, 7. suuntaajamuuntajat, 8. vaihtojännitesuodattimet, 9. ylipäästösuodattimet, 10. 11. yliaallon suodatin, 11. 13. yliaallon suodatin, 12. rinnakkaiskondensaattorit, 13. vaihtojännitekytkinkenttä. (Li 2008.)

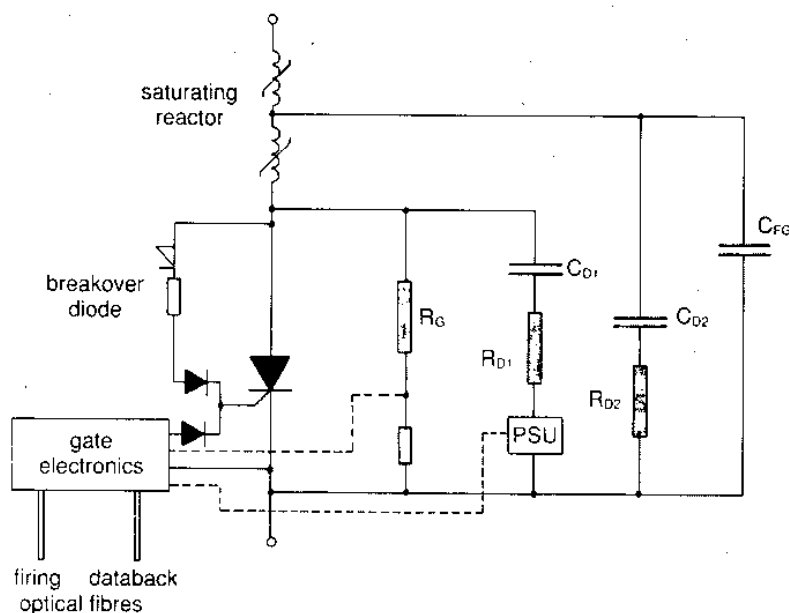
4.1 Tyristoriventtiilit



KUVIO 13. Siemensin venttiilitornin rakenne. (Siemens AG 2011.)

Siemensin standardissa tyristoriventtiilit on ripustettu kattoon joidenkin alueiden seismisten vaatimusten vuoksi. Eristetyt ripustukset on suunniteltu kestäämään telineen paino ja säilyttämään tasapaino yksittäisten ripustusten pettämisen varalta. Kaikki liitännät ripustettuun telineeseen on tehty joustaviksi. Kuviossa 13 on esitetty Siemensin rakenne venttiilien ripustuksesta. Tyristorit on niputettu telineeseen moduuleina, joissa on molemmilla puolilla jäähdytyslevy. Venttiileiden jäähdytys hoidetaan vesijäähdytyksellä. Siemensillä venttiilit jäähdytetään rinnankytketyllä vesijäähdytyksellä. Tästä on se etu, että jäähdytyslämpötilat ovat samat kaikilla venttiileillä ja venttiilien ominaisuudet eivät eroa toisistaan. Korroosio-ongelmat on vältetty asettamalla

jäähdytyspiirin strategiaan kohtiin luokitellut elektrodit. Laitteistojen liekinkestävyyttä on parannettu käyttämällä SF_6 kaasua öljyn tilalla, liitokset on suunniteltu huolellisesti, moduulien väliset etäisyydet ovat tarpeeksi suuret ja käytössä on vain itsestään sammuvia ja palonkestäviä materiaaleja. (Siemens AG 2011, 15, 17.)



KUVIO 14. Yksittäisen tyristoritason tyypillinen virtapiiri (Arrillaga 1998.)

Tyristorien sarjakytkenän vuoksi yksittäiset tyristorit tarvitsevat passiivisia komponentteja jakamaan sammuksissa olevan tilan jännitteen tasaisesti kaikille tyristoreille. Ne toimivat myös suojana liiallisia jännitteen nousunopeuksia, kytKentävirran aiheuttamia nousunopeuksia ja ylijännitteitä vastaan. Kuviossa 14 on esitetty tällaisen virtapiirin kytkentäkaavio. (Arrillaga 1998, 163.)

4.2 Suuntaajamuuntaja

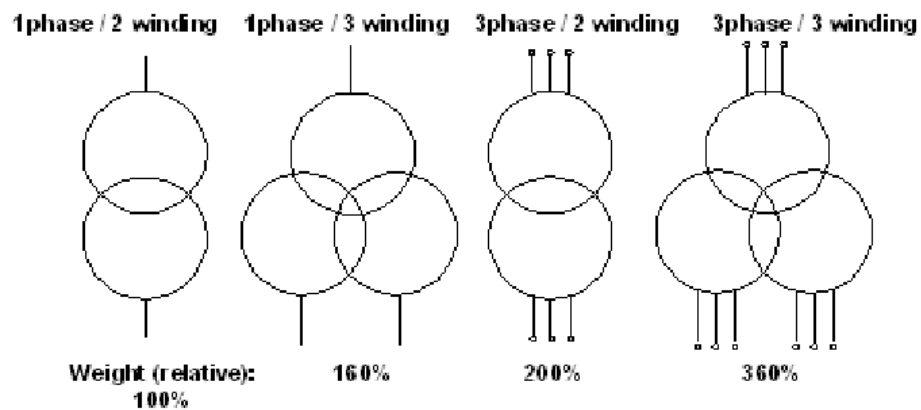
Tasasähköyhteydet aiheuttavat erityisvaatimuksia muuntajille. Tällaisia ovat yhdistetyt jänniterasitukset vaihtojännitteen ja tasajännitteen venttiilien puolelta, Toimintavirran suuret yliaallot ja tasajännitteen aiheuttama ytimen ennalta magnetisoituminen. Muuntajan

ulkoisessa rakenteessa on myös tiettyjä erityisvaatimuksia. Venttiilin puoleisten läpivientieristimien tulisi ulottua venttiilihalliin asti ja jäähdytysjärjestelmän tulisi olla vastakkaisella puolella muuntajan vaihtoa helpottamaan. Pitkien ja korkealle ulottuvien läpivientieristimien vuoksi on tarve nostaa paisuntasäiliö korkealle. Suuntaajamuuntajan tärkein tehtävä on muuntaa jännite vaihtojännitekiskosta suuntaajan vaatimalle tasolle. Tärkeää on myös, että saadaan kytkettyä tyristorisillat sarjaan. Tämä onnistuu vain 30 tai 150 asteen vaiheensiirrolla vaiheiden välillä. Kytkenät voivat olla esimerkiksi Yy0 ja Yd5. Muuntajissa on käämikytkimet, jolloin jännitetasoa voidaan muuttaa käytön aikana. Jaottomien lukujen yliaallot aiheuttavat myös ylimääräisiä rasituksia muuntajan rakenteellisiin osiin ja käämityksiin. (Siemens AG 2011, 19-20.)



KUVIO 15. 1-vaiheinen 2-kääminen suuntaajamuuntaja. (Siemens AG 2011.)

12-pulssisen suuntaajan suuntaajamuuntajat voivat olla kaksi kolmivaiheista kaksikäämitysmuuntajaa, yksi kolmivaiheinen kolmikäämitysmuuntaja, kolme yksivaiheista kolmikäämitysmuuntajaa tai kuusi yksivaiheista kaksikäämitysmuuntajaa. Kuviossa 16 on erilaisia muuntajatyyppejä. (Li 2008, 18-19.)



KUVIO 16. Muuntajatyypit ja niiden suhteelliset painot. Tyypit vasemmalta oikealle lueteltuna: yksivaiheinen kaksikääinen muuntaja, yksivaiheinen kolmikäämitysmuuntaja, kolmevaiheinen kaksikämitysmuuntaja ja kolmivaiheinen kolmikäämitysmuuntaja. (Li 2008.)

4.3 Tasoituskuristin



KUVIO 17. Öljyeristeinen tasoituskuristin. (Siemens AG 2011.)

Tasoituskuristimia on kahta eri tyyppiä. Öljyeristeinen (kuvio 17) ja ilmaeristeinen (kuvio 18) tasoituskuristin. Hyvin suurille tehoille ja seismiset vaatimukset huomioon ottaen öljyeristeinen tasoituskuristin on paras vaihtoehto. Seismisesti epävakailta alueilla reaktorin korkealle nostaminen voi olla ongelma kuivaeristeisillä tasoituskuristimilla. Tasoituskuristimen koko pitkissä tasasähköyhteyksissä on yleensä väliltä 100 – 300 mH ja Back-to-back-asetuksella 30 – 80 mH. Induktanssi on yleensä ainoa asia mikä määrittää erikseen, koska jännite ja virta määräytyvät tasasähköyhteyden tietojen mukaan. (Siemens AG 2011, 21.)

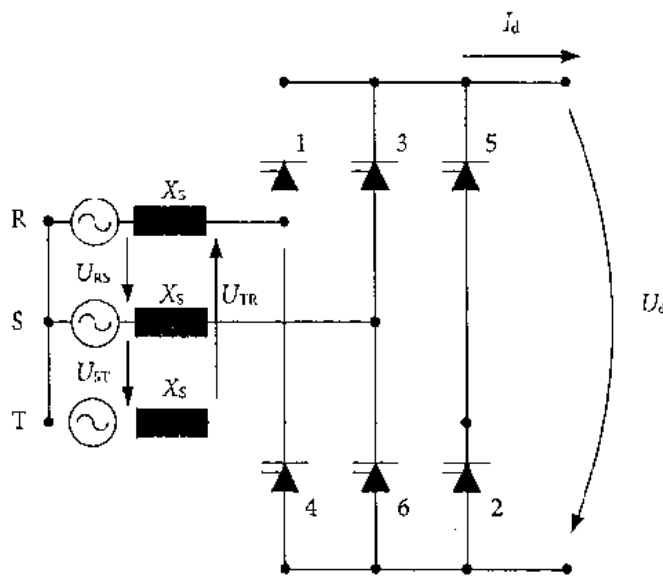


KUVIO 18. Ilmaeristeinen tasoituskuristin (Siemens AG 2011.)

Virran sykkisyyttä tasoitetaan kuristimella. Tasoituskuristin ehkäisee myös resonanssia matalilla taajuuksilla tasasähköpiirissä ja vaihtosähköpuolelta tulevien yliaaltojen kasvamista. Tasoituskuristimen sarjaimpedanssilla on tärkeä rooli virtayliaaltojen

tasoittamisessa ja ilmakaapeleita käytettäessä se ehkäisee myös puhelinhäiriöitä. Erityisesti pitkissä kaapeliyhteyksissä tasoituskuristimen tehtävä toimia vikavirtojen nousunopeuden rajoittajana korostuu. Tasoituskuristin voi pienentää vikavirtojen nousunopeutta kommutointihäiriöissä ja kaapelivioissa. (Siemens AG 2011, 20-21.)

4.4 Tasa- ja vaihtosuuntaus tyristorisillalla

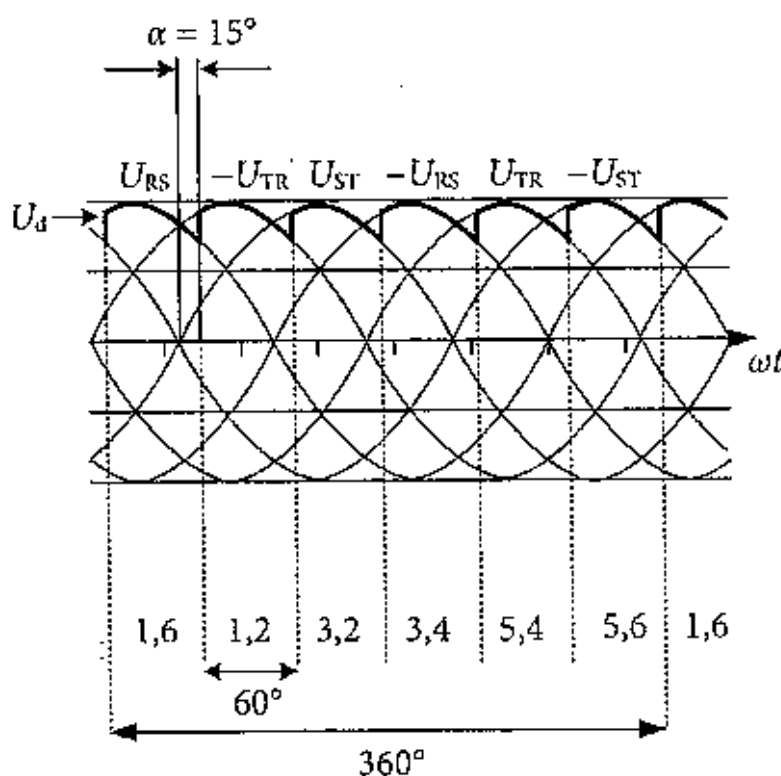


KUVIO 19. 6-pulssinen tyristoreilla toteutettu suuntaajasilta. (Elovaara ja Haarla 2011.)

6-pulssinen suuntaajasilta voidaan toteuttaa kuvion 19 mukaisella kytkennällä. Tyristorin johtavaksi muuttumista voidaan viivastää ohjauskulmalla α , englanniksi (delay angle). Tyristorin ominaisuus on, että se lopettaa johtamisen vasta, kun sen yli oleva jännite kääntyy negatiiviseksi ja virta laskee olemattomiin. Virran vaihtumista venttiililtä toiseen sanotaan kommutoinniksi, jota vastaa kommutointikulma μ (overlap angle). Ohjauskulmilla 0 ja 90 astetta, silta antaa positiivisen jännitteen ja toimii tasasuuntaajana. 6-pulssisen tasasuuntaajan tasajännitteen keskiarvo pystytään laskemaan seuraavalla kaavalla:

$$U_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U \frac{1}{2} (\cos \alpha + \cos (\alpha + \mu)) \approx 1,35 U (\cos \alpha + \cos (\alpha + \mu)) \quad (1)$$

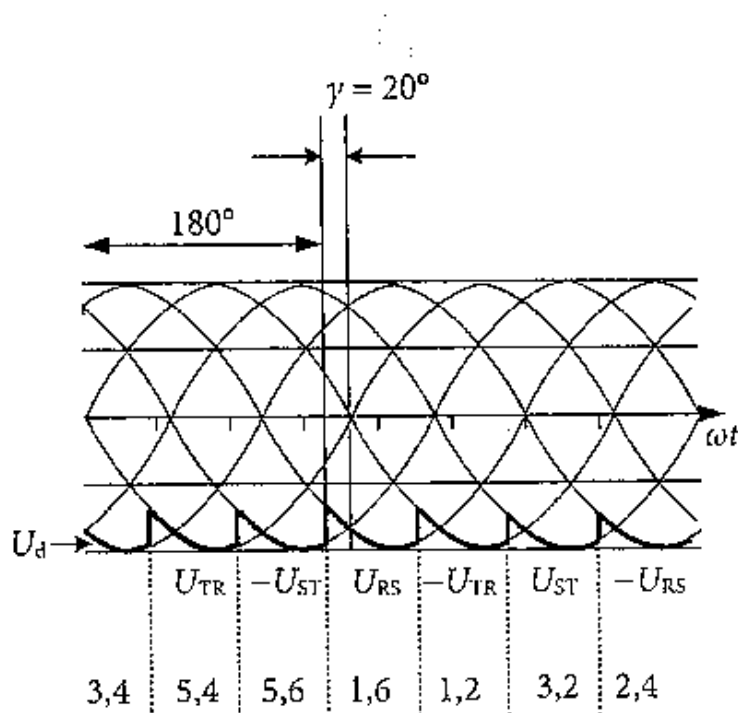
missä U_{dr} on tasajännitteen keskiarvo, U on vaihtosähköpuolen pääjännite, α ohjauskulma ja μ kommutointikulma. Kuviossa 20 on esitetty silta tasasuuntauskäytössä ja nähdään, että saatu tasajännite on pulssimaista. Tämän vuoksi tasasähköpuolelle vaaditaan tasoituskuristin tasaamaan tasavirran pulsseja ja vähentämään yliaaltoja. Se rajoittaa virtaa häiriötilanteissa ja kommutointivioissa. (Elovaara ja Haarla 2011, 311-313.)



KUVIO 20. 6-pulssisillan tuottama ideaalinen tasajännitteen käyrämuoto ohjauskulman α ollessa 15° . (Elovaara ja Haarla 2011.)

Ohjauskulmaa kasvattamalla voidaan pienentää tasajännitettä. Kuitenkin joitakin negatiivisia jaksoja alkaisi esiintyä ohjauskulman ollessa 60° , mutta suuren tasoituskuristimen vuoksi virta pysyisi kuitenkin positiivisena negatiivisten jaksojenkin aikana. 90° asteen ohjauskulmalla negatiivisten ja positiivisten puolijaksojen jännitteiden keskiarvo olisi nolla. 90° asteen jälkeisillä kulmilla toimiessa suuntaaja toimii vaihtosuuntaajana ja syöttää tehoa verkkoon, jos kytkennässä on tasavirtalähde. Tällöin kytkentä pakottaa virran johtumaan samaan suuntaan ja lähteestä tulee negatiivinen. Vaihtosuuntaus vaatii kuitenkin yli 90° asteen ohjauskulman sallivan ohjauksen,

tasavirtalähteen ja aktiivisen kommutointijänniteaallon tarjoavan vaihtojännitelähteen. Vaihtosuuntauskäytössä saadaan kuvion 21 mukainen aaltomuoto. (Arrillaga 1998, 14.)

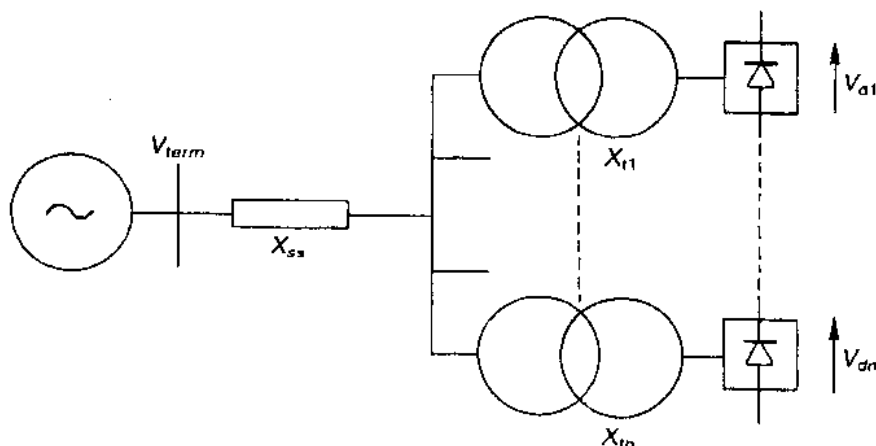


KUVIO 21. 6-pulssisillan tuottama ideaalinen tasajännite sammutuskulman γ ollessa 20° . (Elovaara ja Haarla 2011.)

Vaihtosuuntauskäytössä kulma γ on sammutuskulma (extinction angle). Vaihtosuuntaamisessa tarvitaan kommutointimarginaali (commutation marginal), jotta välttyttäisiin kommutointihäiriöiltä. Tyristorin ominaisuuksien vuoksi se vaatii vähän aikaa negatiivista jännitettä purkaakseen sisäiset varaukset ja estääkseen myötäsuuntaisen jännitteen. Se saattaisi muuten alkaa johtamaan virtaa sytytyspulssista. Vaadittu kommutointimarginaali on riippuvainen kommutointireaktanssin ja tasavirran koosta. Kommutointihäiriöksi (commutation failure) tai sillan kippaamiseksi kutsutaan hetkeä, jolloin kaksi tyristoria on johtavassa tilassa samanaikaisesti. Tilanne vastaa oikosulkua. Yleensä järjestelmä voi hoitaa kommutointihäiriön keskeytyksettä, jos häiriö on hetkellinen. Pätötehon siirto voi laskea olemattomiin tällöin. sattumukset, jotka vaikuttavat verkon jännitteen aallon muotoon aikaansaavat kommutointihäiriöitä. Esimerkkejä näistä ovat sähköverkossa sattuvat kytkentöjen aiheuttamat sysäysvirrat ja muut

vaihtosähköverkon häiriöt, joiden vuoksi verkon jännite voi laskea. (Elovaara ja Haarla 2011, 313-314.)

4.4.1 Kommutointijännite ja kommutointireaktanssi

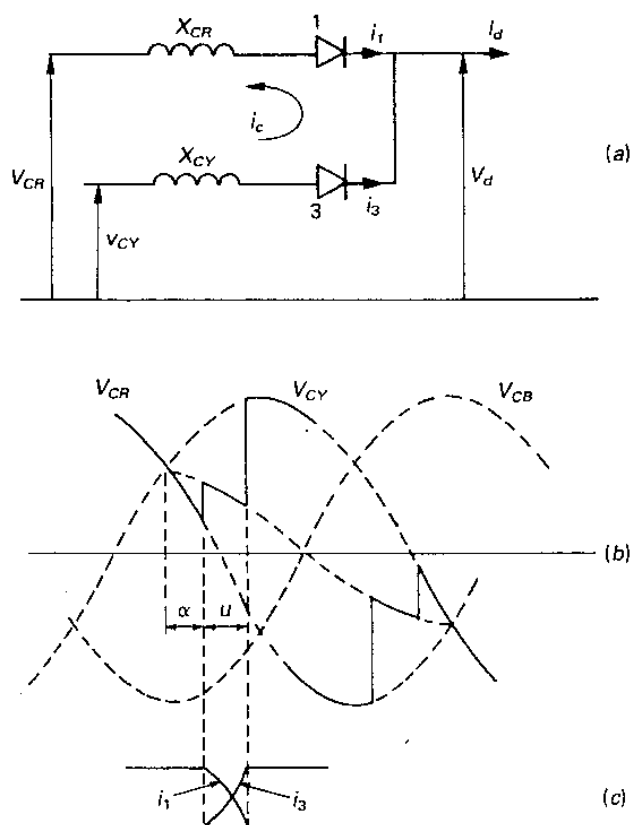


KUVIO 22. Reaktanssikaavio muuntajien siltakytkennoistä. (Arrillaga 1998.)

Kommutointireaktanssiksi sanotaan reaktanssia suuntaajaventtiilien ja kommutointijännitteen välillä. Kommutointijännitteellä taas tarkoitetaan vaihtosähkökiskossa suodatettua jännitettä, jota voidaan pitää tarpeeksi sinimuotoisena suuntaajan vakaassa toimintatilassa. Suuntaajan toiminnan kannalta onkin tärkeää, että suuntaajan käytettävissä on särötön lähde. Kommutointireaktanssiin vaikuttaa siltakytkennot ja vaiheensiirto siltojen välillä. Suuntaaja-asema on kuitenkin käytännössä aina varustettu suodatuslaitteistolla, joka sijaitsee vaihtosähkökiskossa ja muuntajilla on toteutettu vaiheensiirto siltojen välille. Tämän vuoksi lähdeimpedanssia (X_{ss}) kuviossa 22 ei tarvitse huomioida ja sillä ei ole vaikutusta kommutointiin. Joidenkin laitteiden vaikutusta kommutointireaktanssiin ei voida jättää huomioimatta ja tällaisia ovat esimerkiksi synkronikompensoittorit. (Arrillaga 1998, 18-20.)

4.4.2 Kommutointi

Kuvioissa 20 ja 21 esitetyt aaltojen muodot eivät ole todellisuudessa mahdollisia. Tällaisiin aaltomuotoihin vaadittaisiin nolla impedanssin lähde. Esimerkiksi jo muuntajassa on huomattava vuoreaktanssi vaihtojännitejärjestelmän ja suuntaajan välissä. Muuntajia käytetään, koska sillä mahdollistetaan peräkkäisten siltojen vaiheensiirto ja jännitteen säätäminen käämikytkimien avulla. Suuntaamisen kannalta sitä ei muussa tapauksessa tarvittaisi välttämättä ollenkaan. Kommutointiajan pidentäminen on vaihtojännitepuolen reaktanssin suurin vaikutus. Magneettinen energia, joka varastoitui edellisenä johtavan vaiheen reaktanssiin, täytyy siirtää seuraavan vaiheen reaktanssiin kommutoinnin aikana. Tämä energia riippuu jokaisen vaiheen induktanssista ja tasavirran tasosta. Kommutointijännite ja ohjauskulma vaikuttavat myös kommutointiprosessin nopeuteen ja näin ollen virran muutosnopeuteen. (Arrillaga 1998, 18.)



KUVIO 23. Ekvivalenttinen kommutointipiiri ja kommutointiprosessi. Kuviossa käytetty amerikkalaista jännitteen merkintätapaa. (Arrillaga 1998.)

Kuviossa 23 on kuvattu kommutointiprosessi venttiilin 1 ja 3 välillä. Siinä on kuvattu myös aikaisen sytytyksen (tasasuuntaus) ja myöhäisen sytytyksen (vaihtosuuntaus) kommutointi. Kolmannen venttiilin voi sytyttää heti ylempien jänniteaaltojen risteämisen jälkeen ja kommutoinnin täytyy olla valmis ennen alempien jänniteaaltojen risteämistä. Jos ajatellaan, että tämä järjestelmä on kytketty mitättömään lähderesistanssiin, Lähdejännite on vaihtosähköverkon pääjännite U ja kommutointireaktanssi on X_c . Kommutointivirta i_3 kasvaa virran i_1 avulla, koska kuvion 23 aallon V_{CY} jännite on suurempi kuin aallon V_{CR} jännite. Tästä johtuen virta I_d on kaiken aikaa venttiililtä 1 ja venttiililtä 3 tulevien virtojen summa. Jännitehäviöt reaktanssien X_{CR} ja X_{CY} yli ovat samansuuruiset, kun virtojen I_3 ja $-I_1$ muutosnopeudet ovat samat. X_{CR} , X_{CY} ja X_c ovat samansuuruiset, jos oletetaan niiden olevan balanssissa. Kun otetaan huomioon kommutointikulma μ ja oletetaan, että kommutointivirta i_c on suuntaajan sillan antama virta I_d . Saadaan kaava, josta voidaan laskea tasasuuntaajan virta I_d :

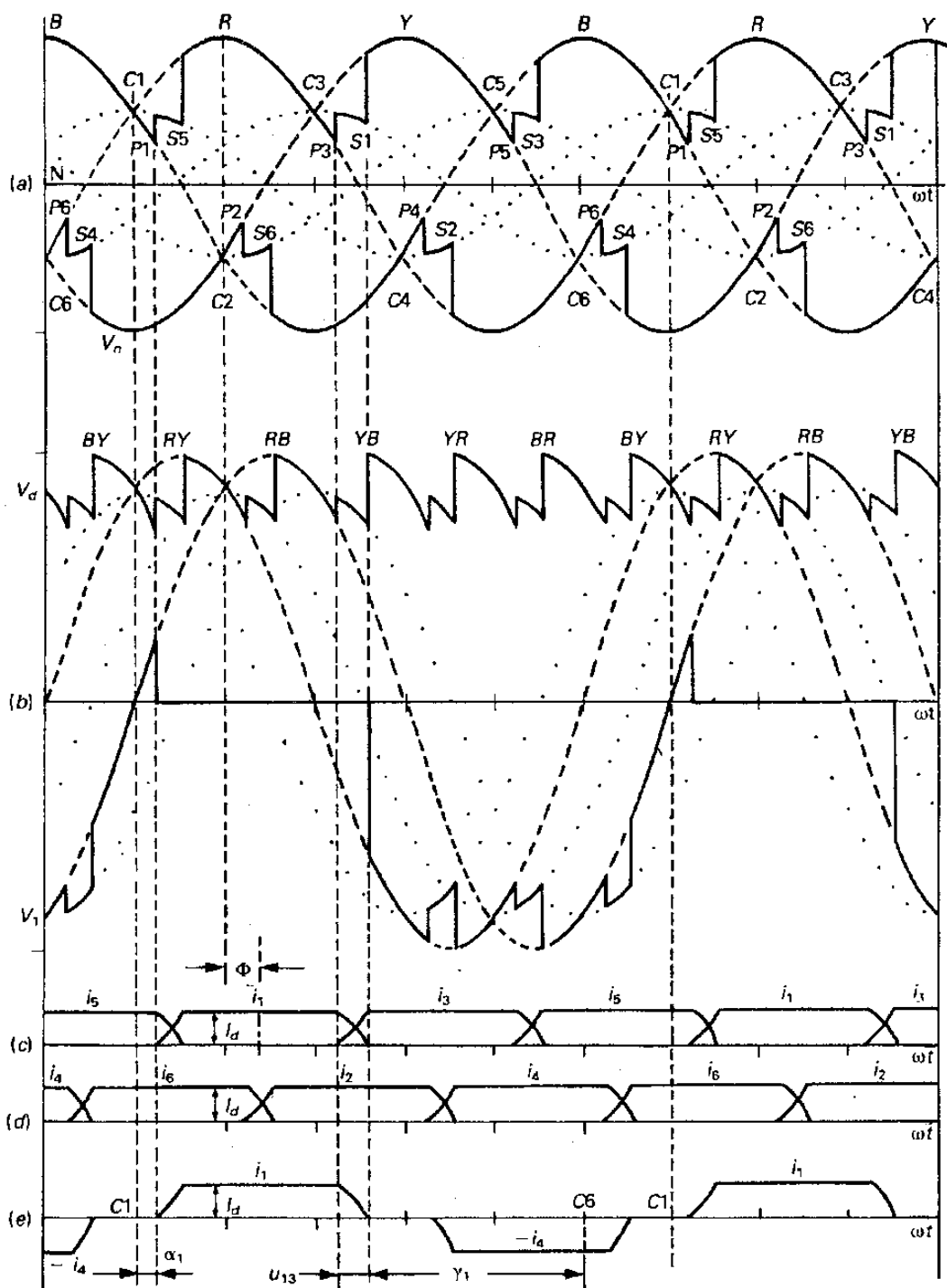
$$I_d = \frac{U}{\sqrt{2}X_c} (\cos \alpha - \cos (\alpha + \mu)) \quad (2)$$

missä U on vaihtosähköpuolen pääjännite, X_c on kommutointireaktanssi, α on ohjauskulma ja μ on kommutointikulma. (Arrillaga 1998, 23-24.)

4.4.3 Todellinen tasa- ja vaihtosuuntaaja

Likiarvoja suuntaajan normaalin toimintatilan yhtälöistä voidaan muodostaa, kun ensin tehdään joitakin oletuksia. Kahta yhtäaikaista kommutointia ei tapahdu. Vain kaksi tai kolme venttiiliä voi johtaa yhtä aikaa. Suuren tasoituskuristimen ansiosta tasavirta on särötöntä ja tasaista muodoltaan. Kaikkien vaiheiden resistiiviset komponentit voidaan jättää huomiotta ja kommutointireaktanssit ovat yhtä suuria. Tehohäviöiden laskennassa venttiilien resistanssi voidaan lisätä tasajännitteen siirtolinjaan ja tasasuuntausventtiilien oletetaan olevan ideaalisia kytkimiä. Kuviossa 24 on esitetty tyypillisen 6-pulssisillan jännitteen ja virran muoto ilman suodatusta, kun kommutointi on otettu huomioon. Kuvion kohdassa (a) on esitetty venttiilin syttyminen kirjaimella P ja kommutoinnin päättymistä kirjaimella S. Kohta (b) esittää tasajännitepuolen aaltomuotoa, jossa seurataan venttiilin 1 jännitettä. Kohdat (c) ja (d) esittävät venttiilien virtoja. Kohta (e) on vaihtojännitepuolen virta aallosta R. Kohdassa (b) voidaan havaita jännitesärö seuraamalla aaltoa RY.

Venttiilin 2 (S2) kommutointi venttiiliin 4 (P4) pienentää vaiheen R negatiivista potentiaalia aiheuttaen ensimmäisen särön. Seuraavan särön aiheuttaa venttiilin 5 (P5) sytyttäminen, joka nostaa molempien katodien potentiaalin aallon YB tasolle. Samasta syystä säröytyminen toistuu kaikissa aalloissa. (Arrillaga 1998, 25-28.)



KUVIO 24. 6-pulssisen tasasuuntaajan toimintakaavio. (Arrillaga 1998.)

Ideaalinen tyhjäkäyntitasajännite lasketaan Integroimalla yhden venttiilin jännitettä sen toimimisen ajalta. Seuraavan kaavan johtamisessa ei ole huomioitu kommutoinnin aiheuttamaa tasajännitteen alenemista (Elovaara ja Haarla 2011, 311.):

$$\begin{aligned}
 U_{dri} &= \sqrt{2}U \frac{1}{2\pi/6} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \cos x \, dx \\
 &= \frac{6\sqrt{2}U}{2\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right] \\
 &= \frac{3\sqrt{2}U}{\pi} 2 \sin \frac{\pi}{6} \cos \alpha \\
 &= \frac{3\sqrt{2}U}{\pi} \cos \alpha \approx 1,35U \cos \alpha
 \end{aligned} \tag{3}$$

missä U_{dri} on ohjaamattoman sillan ideaalinen tyhjäkäyntitasajännite, U on vaihtosähköpuolen pääjännite ja α ohjauskulma. Ideaalisen suuntaajan yhtälöön voidaan lisätä kommutointikulman μ aiheuttama tasajännitteen lasku ja tuloksena on todellinen tasajännite (Elovaara ja Haarla 2011, 312.):

$$U_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U \frac{1}{2} (\cos \alpha + \cos (\alpha + \mu)) \tag{4}$$

6-pulssisen tasasuuntaajan ideaalinen perusyhtälö pystytään muodostamaan kaavasta, jossa on otettu huomioon suuntaajamuuntajan muuntosuhde m . Samaa yhtälöä on mahdollista käyttää vaihtosuuntaajalle, kun ohjauskulma α korvataan sammutuskulmalla γ . On huomioitava, että sammutuskulmalla laskettaessa käytetään kulmaa $180^\circ - \gamma$.

Seuraavassa kaavassa ohjauskulma α on 0° ja kommutointia ei ole huomioitu (Elovaara ja Haarla 2011, 314.):

$$U_{d0r} = \frac{3\sqrt{2}}{m\pi} U \quad (5)$$

missä U_{d0r} on ohjaamattoman 6-pulssisen sillan tasajännite, m on muuntosuhde (vaihtosähköpuolen jännite jaettuna suuntaajan puoleisella jännitteellä) ja U on vaihtosähköverkon pääjännite. Perusyhtälö kerrotaan kahdella 12-pulssisillan ollessa kyseessä. Kaavassa ei ole huomioitu kommutoinnin vaikutusta (Elovaara ja Haarla 2011, 314.):

$$U_{d0r12} = 2 \frac{3\sqrt{2}}{m\pi} U \quad (6)$$

Ohjauskulma on yleensä tasasuuntaavalla 12-pulssisillalla noin 15 astetta. 12-pulssisillan kaavaan voidaan lisätä kommutointireaktanssin jännitettä alentava vaikutus (Elovaara ja Haarla 2011, 314.):

$$U_{dr12} = 2 \left(\frac{3\sqrt{2}}{k\pi} U \cos \alpha - \frac{3X_c}{\pi} I_d \right) \quad (7)$$

missä X_c on kommutointireaktanssi, I_d on tasasuuntaajan virta. Vaihtosuuntauskäytössä tyypillinen sammutuskulma γ on 15 – 20 astetta, koska sammutuskulman sytyttämisen jälkeiset tapahtumat saattavat olla ennakoimattomia. Tästä syystä minimisammutuskulmaan on sisällyttävä varmuusvara, että tyristori ehtii varmasti saavuttaa estokykynsä uudelleen. Kuviosta 25 nähdään, että Aallon säröytyminen johtuu samoista syistä kuin tasasuuntaajassakin ja vaihtosuuntaajan toiminta ei juuri eroa tasasuuntaajan toiminnasta. (Arrillaga 1998, 27-28.)

Ohjaamattoman 6-pulssisillan perusyhtälö vaihtosuuntauskäytössä, jossa kommutointia ei ole huomioitu on (Elovaara ja Haarla 2011, 314.):

$$U_{d0i} = \frac{3\sqrt{2}}{k\pi} U \quad (8)$$

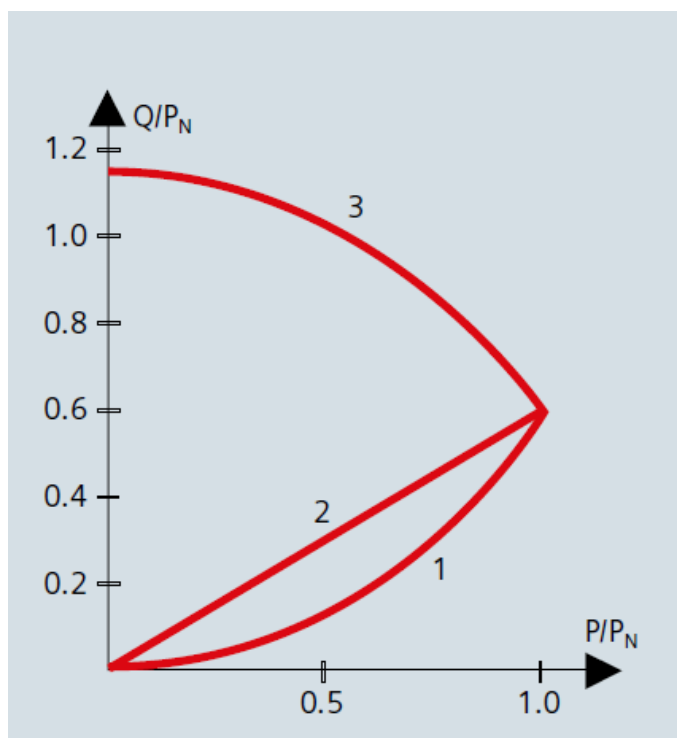
missä U_{d0i} on vaihtosuuntaussillan tasajännite, kun sammutuskulma γ on 0 astetta, k on suuntaajamuuntajan muuntosuhde (vaihtosähköpuolen jännite jaettuna suuntaajan puoleisella jännitteellä) ja U on sähköverkon puoleinen pääjännite. Kommutointi vaikuttaa laskevasti vaihtosuuntaajankin tasajännitteeseen. Ohjatun vaihtosuuntaussillan yhtälö on (Elovaara ja Haarla 2011, 314.):

$$U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{k\pi} U \cos \gamma - \frac{3X_c}{\pi} I_d = U_{dr} - R_L I_d \quad (9)$$

missä U_{di} on vaihtosuuntaajan tasajännite, X_c on muuntajan reaktanssi, R_L on tasasähköpiirin resistanssi ja I_d piirin tasavirta. Yhtälöt voidaan kertoa kahdella 12-pulssisen tasasuuntaussillan ollessa kyseessä (Elovaara ja Haarla 2011, 314-315.)

4.4.4 Loisteho

Tyristorisilta kuluttaa loistehoa. Loisteho tarkoittaa sitä, että virta on jännitettä jäljessä. Tyristorisillalla loistehoa jokaisella vaiheella aiheuttaa kommutointikulma ja ohjauskulma. Kuviosta 24 kohdasta (c) nähdään virran aallon tulevan jänniteaallon jälkeen. 6-pulssisen vaihtosuuntaajan virta on 90 astetta jäljessä tai edellä vastaavaa jänniteaaltoa. Tämä voidaan havaita vertaamalla kohtia (a) ja (e) kuviosta 25. Tästä johtuen myös vaihtosuuntaaja kuluttaa loistehoa (vareja), kuten tasasuuntaajakin. Pienillä tehoilla toimittaessa 90 asteen kulmalla loistehon tarve olisi hyvin suuri. Kulmaa pyritään kuitenkin pienentämään normaalissa toimintatilassa mahdollisimman pienellä sammutuskulmalla γ ja muuntajan käämikytkimellä. Kulma \emptyset kuvaa perustaajuisen jännitteen ja virran välistä kulmaa. Ideaalisissa olosuhteissa vaihtosähköpuolen ja tasasähköpuolen teho on samansuuruinen. Olettaen, että kaikki siirtohäviöt on kumottu. Tehokerroin ($\cos \phi$) voidaan likiarvoistaa oletuksella, että säröytynyttä virtaa ei pääse täydellisen suodatuksen vuoksi suodattimien ohi ja tästä syystä vaihtosähköpuolen teho olisi sama kuin tasasähkön siirtoteho. (Arrillaga 1998, 28-30.)



KUVIO 26. Suuntaajan loistehon tarve. (Siemens AG 2011.)

Kuviossa 26 on esitetty kuvaaja 12-pulssisen sillan loistehon (Q) ja pätötehon (P) käyttäytymisestä suhteessa nimellistehoon (P_N) eri tehonsäätötavoilla. Mikä tahansa arvo käyrien 1 ja 3 välillä on mahdollinen muuttamalla kulmia α ja γ . Jos oletetaan, että joitakin ominaisuuksia pysyy vakiona, niin saadaan piirrettyä toimintasuoria. Käyrällä 1 loisteho kasvaa hillityimmin, kun tehoa kasvatetaan ohjauskulman α tai sammutuskulman γ ollessa vakiona. Käyrässä 2 vaihtosähköpuolen pääjännite ja vaihtosuuntaajan jännite pidetään vakiona. Käyrässä 3 kuvataan tilannetta, jossa tehoa muutetaan pitämällä virta vakiona tasajännitettä säätämällä. (Siemens AG 2011, 9.)

Tyristorisilta kuluttaa loistehoa. Loistehon kulutus kasvaa ohjauskulman α tai sammutuskulman γ kasvaessa. Tästä syystä tasajännitettä yritetään muuttaa ensin muuntajan käämikytkimellä. Käämikytkin on hidas säätää ja toimii portaittaisesti. Säätämällä sillan kuluttamaan tavoitellun arvon verran loistehoa, voidaan tasasähköyhteyttä käyttää jatkuvaan loistehon säätöön ohjauskulmia muuttamalla. Vaihto ja tasasuuntaajan teho voidaan laskea kaavoilla (Elovaara ja Haarla 2011, 315, 321.):

$$P_{di} = U_{di} I_d \quad (10)$$

$$P_{dr} = U_{dr} I_d \quad (11)$$

$$P_{dr} = U_{di} I_d + I_d^2 R_L \quad (12)$$

missä, P_{di} on vaihtosuuntaajan teho, P_{dr} on tasasuuntaajan teho, U_{di} on tasasuuntaajan jännite, U_{dr} on vaihtosuuntaajan jännite, P_{dr} on tasasuuntaajan teho, R_L on piirin tasasähköresistanssi ja I_d tasasähköpiirin virta. Tehokertoimen ($\cos \emptyset$) tarpeeksi tarkka likiarvo matalilla kommutointikulman μ arvoilla pystytään laskemaan kaavalla (Elovaara ja Haarla 2011, 315.):

$$\cos \emptyset_r \approx \frac{U_{dr}}{U_{dor}} = \frac{\cos \alpha + \cos (\alpha + \mu)}{2} \quad (13)$$

$$\cos \emptyset_i \approx \frac{U_{di}}{U_{doi}} = \frac{\cos \gamma + \cos (\gamma + \mu)}{2} \quad (14)$$

missä, $\cos \emptyset_r$ on tasasuuntaajan tehokerroin, $\cos \emptyset_i$ on vaihtosuuntaajan tehokerroin, U_{dor} on tasasuuntaajan perusyhtälö ilman kommutointia ja U_{doi} on vaihtosuuntaajan perusyhtälö ilman kommutointia. (Elovaara ja Haarla 2011, 315.)

Sillan loisteho voidaan laskea kaavalla (Arrillaga 1998, 30.):

$$Q = P \cdot \tan \emptyset \quad (15)$$

missä, P on sillan pätöteho. Kun tunnetaan ohjauskulman α ja sammutuskulma γ . Riittävän tarkka $\tan \emptyset$ on mahdollista laskea kaavalla (Arrillaga 1998, 30.):

$$\tan \emptyset = \frac{\sin(2\alpha + 2\mu) - \sin 2\alpha - 2\mu}{\cos 2\alpha - \cos(2\alpha + 2\mu)} \quad (16)$$

4.4.5 Yliaallot

Suuntaajasilta aiheuttaa vaihtosähköpuolelle virtayliaaltoja ja tasasähköpuolelle jänniteyliaaltoja. Tasasähköpuolella voi sijaita tasasähkösuodatin jänniteyliaaltojen suodattamiseen. 6-pulssisillan tasasähköpuolen harmonisten jänniteyliaaltojen järjestysluku on $n = k \cdot 6$, missä k on kokonaisluku. Isoimmat harmoniset virtayliaallot vaihtosähköpuolella 6-pulssisillalla ovat suuruudeltaan 5. ja 7. aalto. Harmonisten virtojen järjestysluku on 6-pulssisillalla $k \cdot 6 \pm 1$ ja 12-pulssisella sillalla $n = k \cdot 12 \pm 1$, missä k on

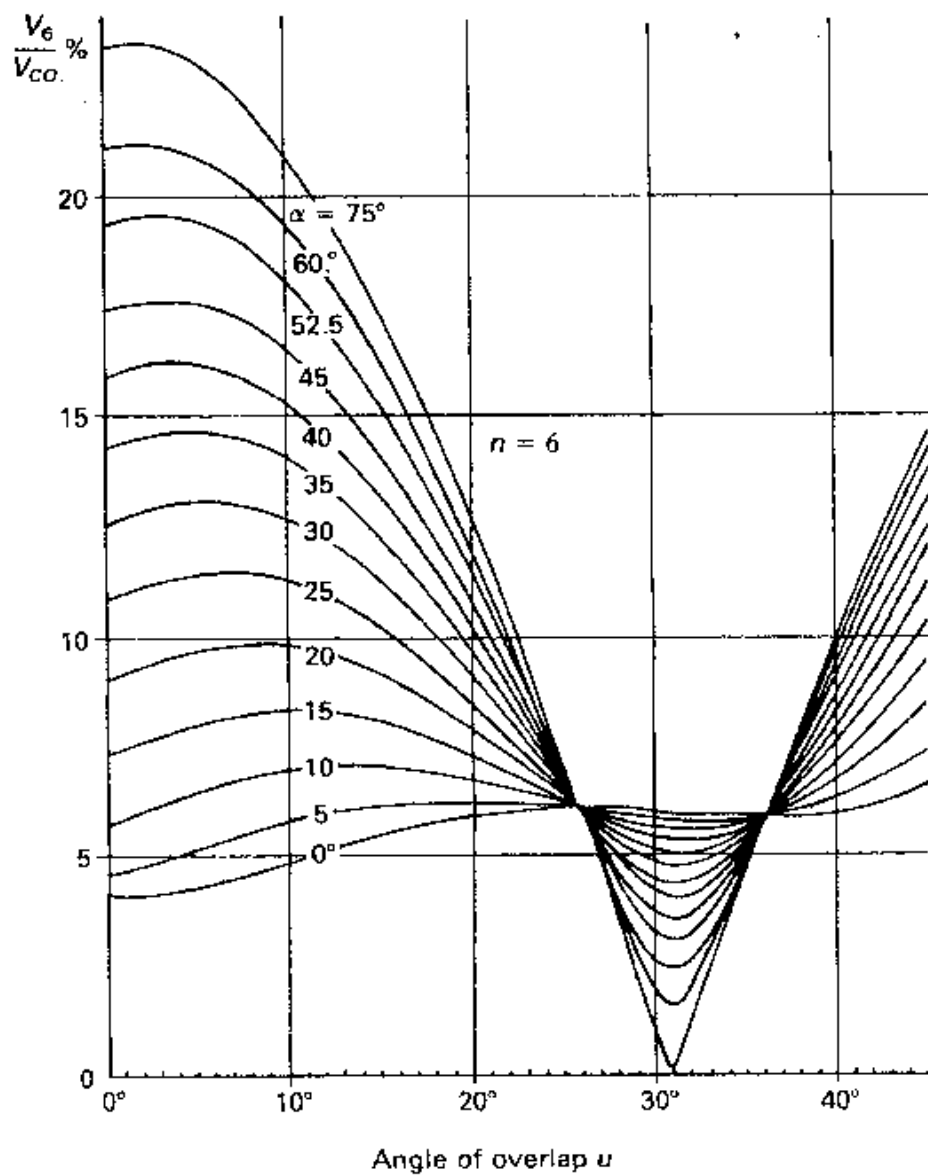
kokonaisluku. 5. ja 7. yliaalto saadaan kumottua 12-pulssisella sillalla, jolloin isoimmat aallot ovat 11. ja 13. yliaalto. Kaksi 6-pulssisiltaa on kytketty sarjaan 12-pulssisessa sillassa. Näiden siltojen muuntajien vaihesiirto on 30 astetta, kun toisella sillalla olevan muuntajan toisio on yhdistetty tähteen ja toisen kolmioon. (Elovaara ja Haarla 2011, 321.)

Karakteristisiksi yliaalloiksi sanotaan aaltoja, joita esiintyy vain ideaalisissa olosuhteissa ja vain yliaaltojen monikertoja esiintyy. Silloin joudutaan oletamaan, että venttiilit johtavat täsmällisillä aikaväleillä, Tasoituskuristin tasaa jännitteen täysin pulssittomaksi, kaikkien vaiheiden kommutointi-impedanssit ovat samat ja jännitelähde pysyy nimellistaajuksena. (Arrillaga 1998, 33-34.)

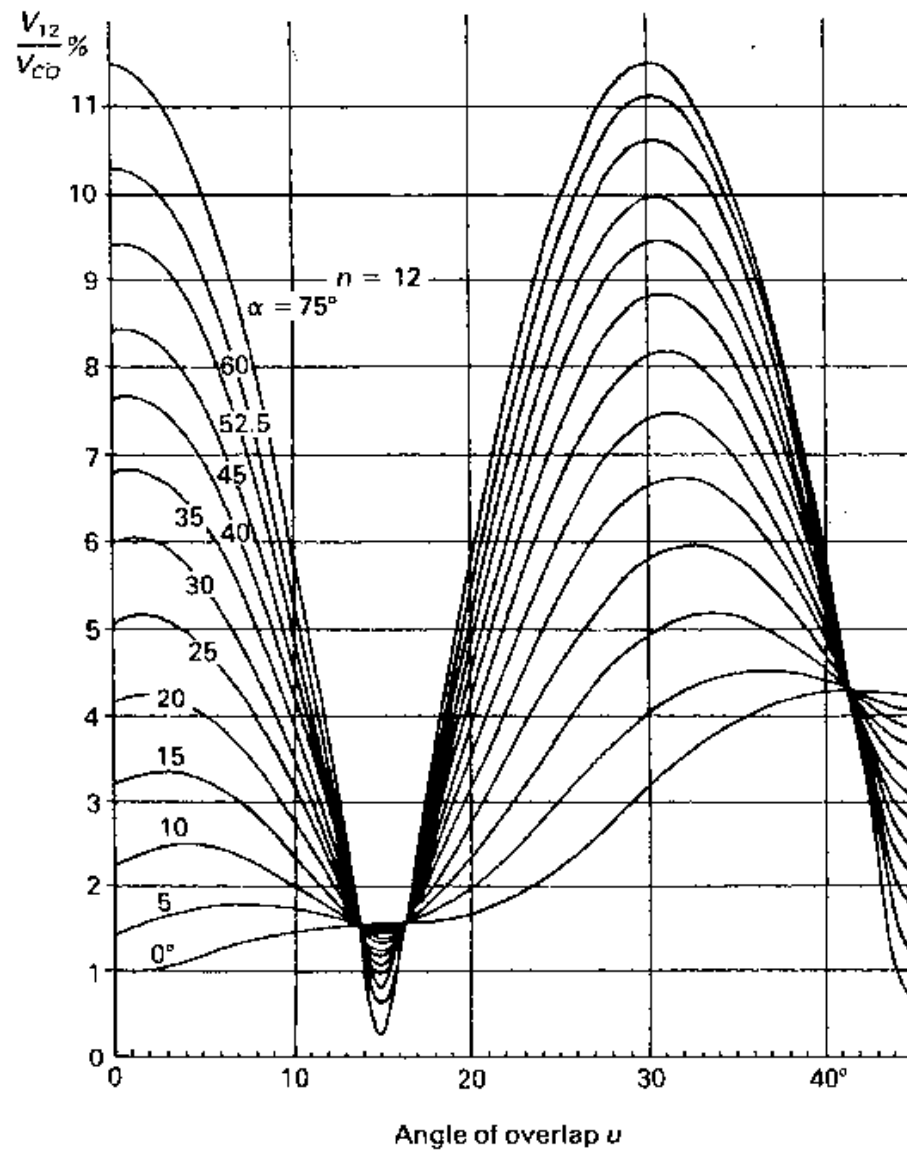
Suuntaaja aiheuttaa jänniteyliaaltoja tasasähköpuolelle. Tasasähköpuolella 12-pulssisillalla 6. jännitteen yliaalto kumoutuisi 30 asteen muuntajien vaihesiirrolla, koska 30 asteen siirto taajuudessa vastaa puolta jaksoa kuudennesta harmonisesta. Kuviossa 27 ja 28 on esitetty ohjauskulman α ja kommutointikulman μ muutosten vaikutukset 6-pulssisillalla harmonisten yliaaltojen suuruuteen. Fourier yhtälöllä voidaan laskea harmonisen jänniteyliaallon tehollisarvo U_n (Arrillaga 1998, 34.):

$$U_n = \frac{\frac{3\sqrt{2}}{\pi} U}{\sqrt{2(n^2-1)}} \sqrt{\begin{aligned} & \{ (n-1)^2 \cos^2 \left[(n+1) \frac{\mu}{2} \right] + (n+1)^2 \cos^2 \left[(n-1) \frac{\mu}{2} \right] \\ & - 2(n-1)(n+1) \cos \left[(n+1) \frac{\mu}{2} \right] \cos \left[(n-1) \frac{\mu}{2} \right] \cos (2\alpha + \mu) \} \end{aligned}} \quad (17)$$

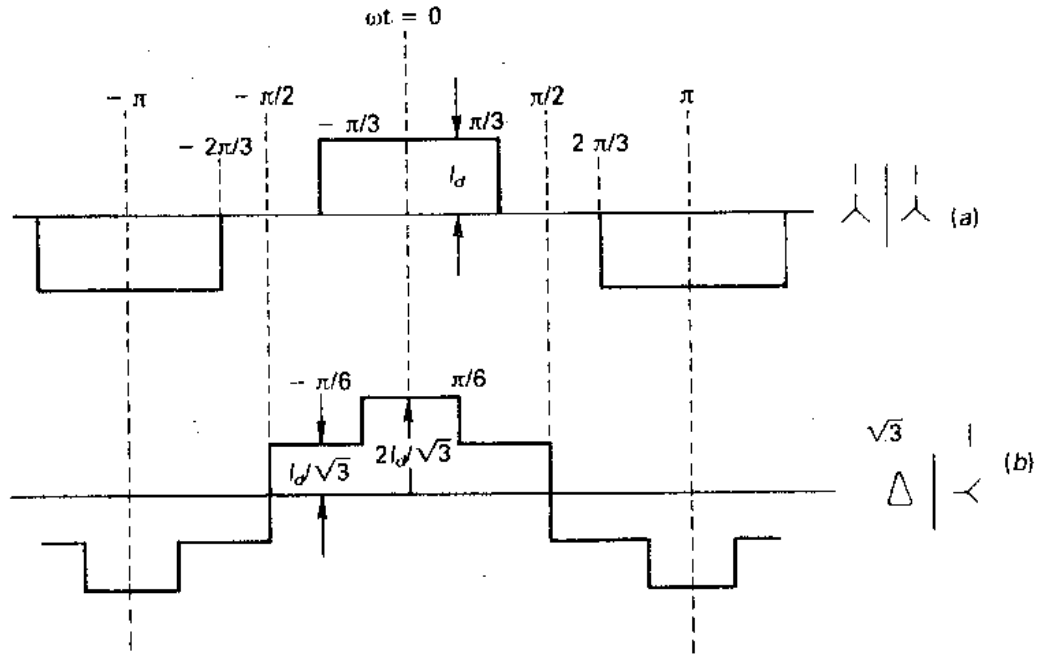
missä, U on vaihtosähköpuolen pääjännite, n on harmonisen jännitteen järjestysluku, α on ohjauskulma ja μ kommutointikulma. Kuvioista voidaan havaita, että harmonisten yliaaltojen järjestysluvun kasvaessa ohjauskulman α säätäminen vaikuttaa jyrkemmin jänniteyliaaltoihin. (Arrillaga 1998, 34-35.)



KUVIO 27. Kommutointikulman μ ja ohjauskulman α vaikutus tasasähköpuolen 6. harmonisen jänniteylijännitteen suhteesta ideaaliseen tyhjäkäyntitasajännitteeseen. (Arrillaga 1998.)



KUVIO 28. Kommutointikulman μ ja ohjauskulman α vaikutus tasasähköpuolen 12. harmonisen jänniteylijännitteen suhteesta ideaaliseen tyhjäkäyntitasajännitteeseen. (Arrillaga 1998.)



KUVIO 29. Ensiöpuolen ideaaliset virta-aallot tähti ja kolmio-kytkennällä. (Arrillaga 1998.)

Suuntaaja aiheuttaa virtayliaaltoja vaihtosähköpuolelle. Kuviossa 29 esitetyt virta-aallot ovat mahdollisia vain, jos kommutointireaktanssia ei oteta huomioon. Tällaisen tähti- ja kolmioaallon virran hetkellisarvon Fourier sarjan kaavat ovat (Arrillaga 1998, 36-37.):

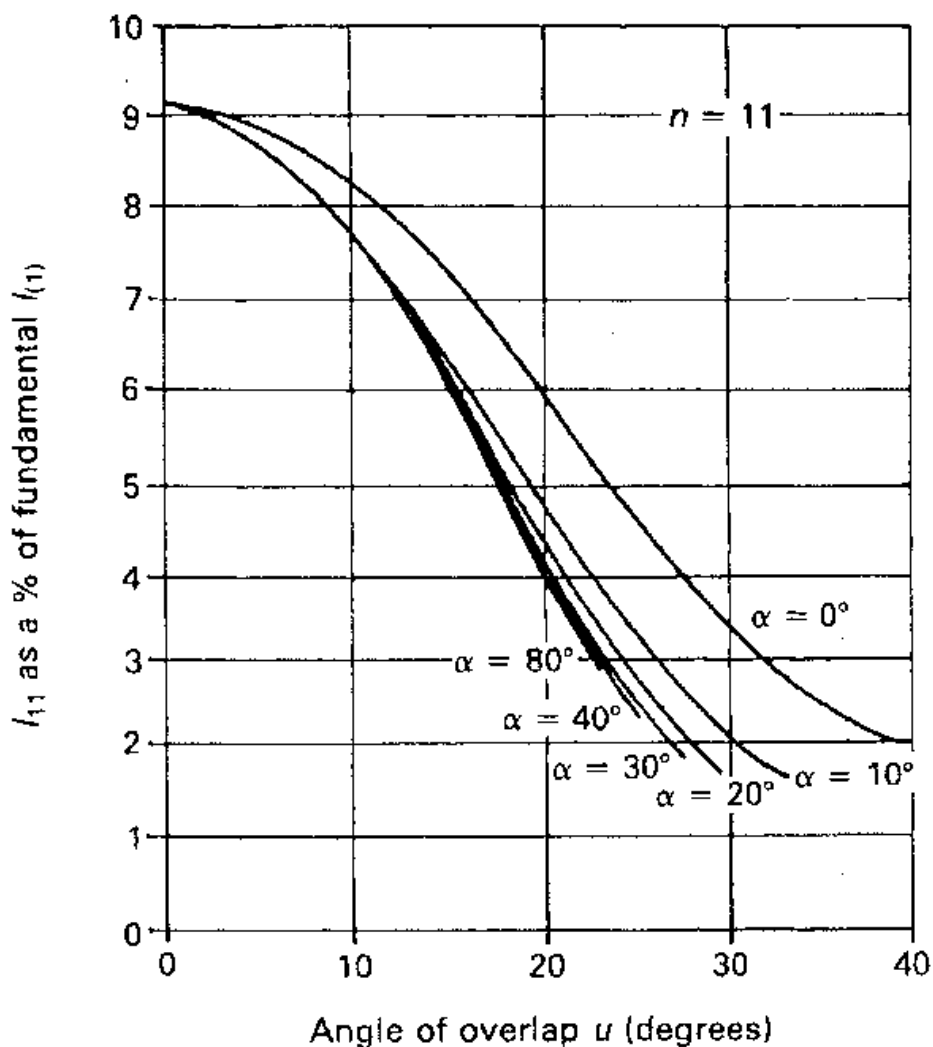
$$i_Y = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5 \omega t + \frac{1}{7} \cos 7 \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t + \dots) \quad (18)$$

$$i_\Delta = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5 \omega t - \frac{1}{7} \cos 7 \omega t - \frac{1}{11} \cos 11 \omega t + \dots) \quad (19)$$

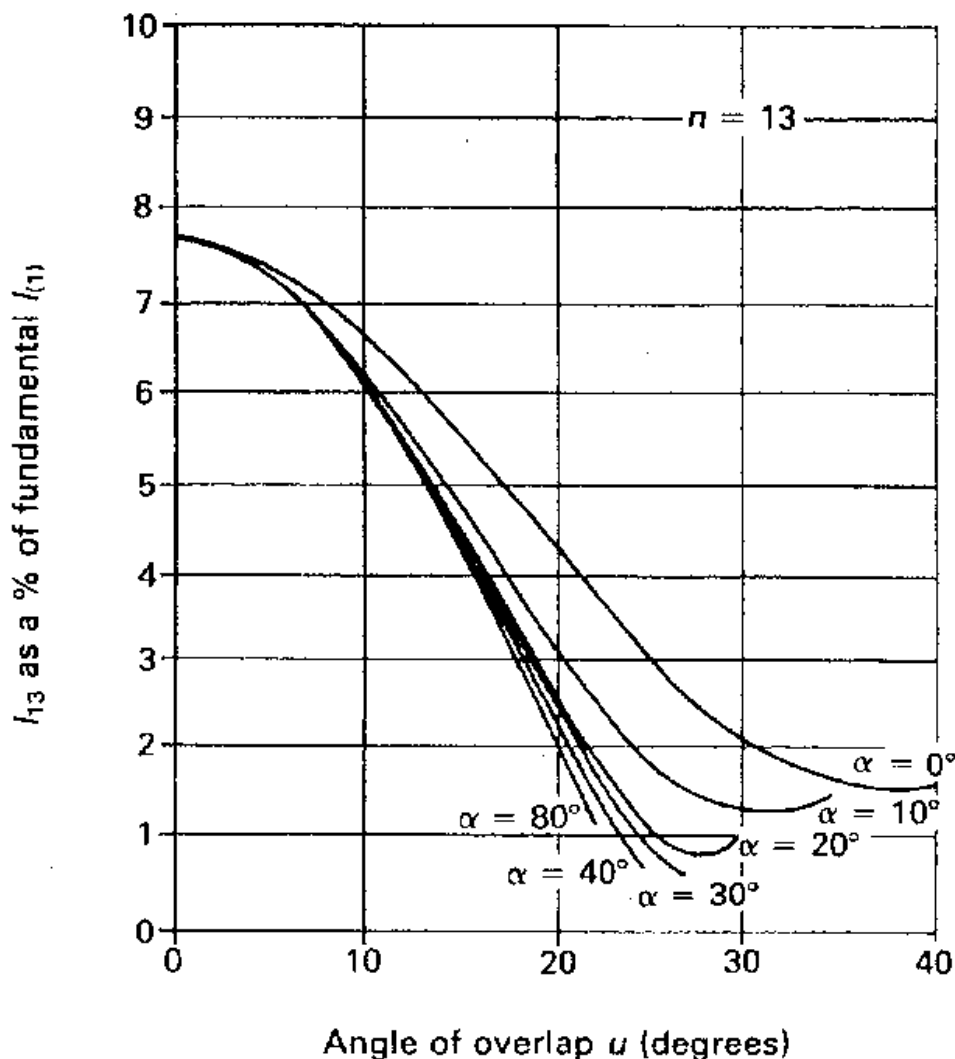
missä, i_Y on tähteen kytketyn toisios virran hetkellisarvo, i_Δ on kolmioon kytketyn toisios virran hetkellisarvo, I_d on tasasähköpiirin virta ja ωt on virran aallon kulma hetkellä t . Kaavoista voidaan havaita, että kahden sillan ollessa sarjassa 5. ja 7. yliaalto kumoavat toisensa, koska ovat käänteisiä toisiinsa nähden. Tällöin harmonisten virtojen järjestysluku on $n = 12k \pm 1$. Harmonisen virran suuruus voidaan laskea kaavalla (Arrillaga 1998, 37-38.):

$$I_n = \frac{\sqrt{6}}{n\pi} I_d \quad (20)$$

Kuviossa 30 ja 31 on esitetty todellinen 11. ja 13. yliaallon virta prosentuaalisena suhteena nimellisvirtaan. Kuvioista voidaan päätellä, että kommutointikulman μ kasvaessa harmoniset virtayliaallot pienenevät ja ohjauskulman α muutoksen vaikutukset virtaan alueella 10 – 80 astetta on hyvin pieni. Suuremmilla harmonisilla yliaalloilla tämä pieneminen on nopeampaa. Ohjauskulma α on normaalissa toiminnassa yleensä yli 10 astetta ja kommutointikulma μ noin 20 astetta. Vaihtosuuntaajan tapauksessa voidaan käyttää samoja kuvaajia. Kulmat vain korvataan vaihtosuuntaajan kulmilla. (Arrillaga 1998, 38-41.)



KUVIO 30. Kommutointikulman μ ja ohjauskulman α vaikutus vaihtosähköpuolen 11. harmonisen virtayliaallon suhteesta vaihtosähköpuolen nimellisvirtaan. (Arrillaga 1998.)



KUVIO 31. Kommutointikulman μ ja ohjauskulman α vaikutus vaihtosähköpuolen 13. harmonisen virtayliaallon suhteesta vaihtosähköpuolen nimellisvirtaan. (Arrillaga 1998.)

Epäkarakteristisia yliaaltoja on pieninä määrinä aina olemassa. Ideaaliset olosuhteet yliaaltojen laskemiseen ei käytännössä koskaan toteudu. Epäkarakteristiset yliaallot voivat tapahtua kaikilla muilla, kuin karakteristisilla vaihtosähköpuolen taajuuksilla. Epäkarakteristiset yliaallot johtuvat monista syistä, mutta yleensä vaihtosähköjärjestelmän epälineaarisuudesta, nimellistaajuisesta virrasta tasasähköpiirissä ja järjestelmän epätasapainosta. Harmonisiin liittymättömiä taajuuksia esiintyy erityisesti, kun liitetään yhteen kaksi eri vaihtosähköjärjestelmää. Tämä ilmiö on erityisen kriittinen, kun suuntaaja-asemat ovat lähellä toisiaan. Esimerkiksi back-to-back – yhteydellä. (Arrillaga 1998, 39-42.)

4.5 Tehon säätäminen

Säätämällä johdon päissä olevien tasajännitteiden itseisarvojen eroa, voidaan siirrettävän tehon suuruutta säätää. Virran suunnan pysyessä aina samana, voidaan tehon suuntaa muuttaa vaihtamalla siltojen tasajännitteiden napaisuudet. Siltojen napaisuuden voi vaihtaa muuttamalla vaihtosuuntaaja tasasuuntaajaksi ja tasasuuntaaja vaihtosuuntaajaksi. Kuvion 32 esimerkissä kumpikin suuntaaja-asema käyttää 12-pulssista siltaa. Yhteyden tasavirta riippuu tasasähköpiirin resistanssista R_L ja esimerkiksi (a) kohdan virta voidaan laskea kaavalla (Elovaara ja Haarla 2011, 316-317.):

$$I_d = \frac{U_{dr} - U_{di}}{R_L} = \frac{506 \text{ kV} - 500 \text{ kV}}{5 \Omega} = 1200 \text{ A} \quad (21)$$

missä, U_{dr} on tasasuuntaajan tasajännite ja U_{di} on vaihtosuuntaajan tasajännite. Vastaavasti, kun tehoa siirretään toiseen suuntaan kohdassa (b) (Elovaara ja Haarla 2011, 316.):

$$I_d = \frac{U_{dr} - U_{di}}{R_L} = \frac{-500 \text{ kV} - (-506 \text{ kV})}{5 \Omega} = 1200 \text{ A} \quad (22)$$

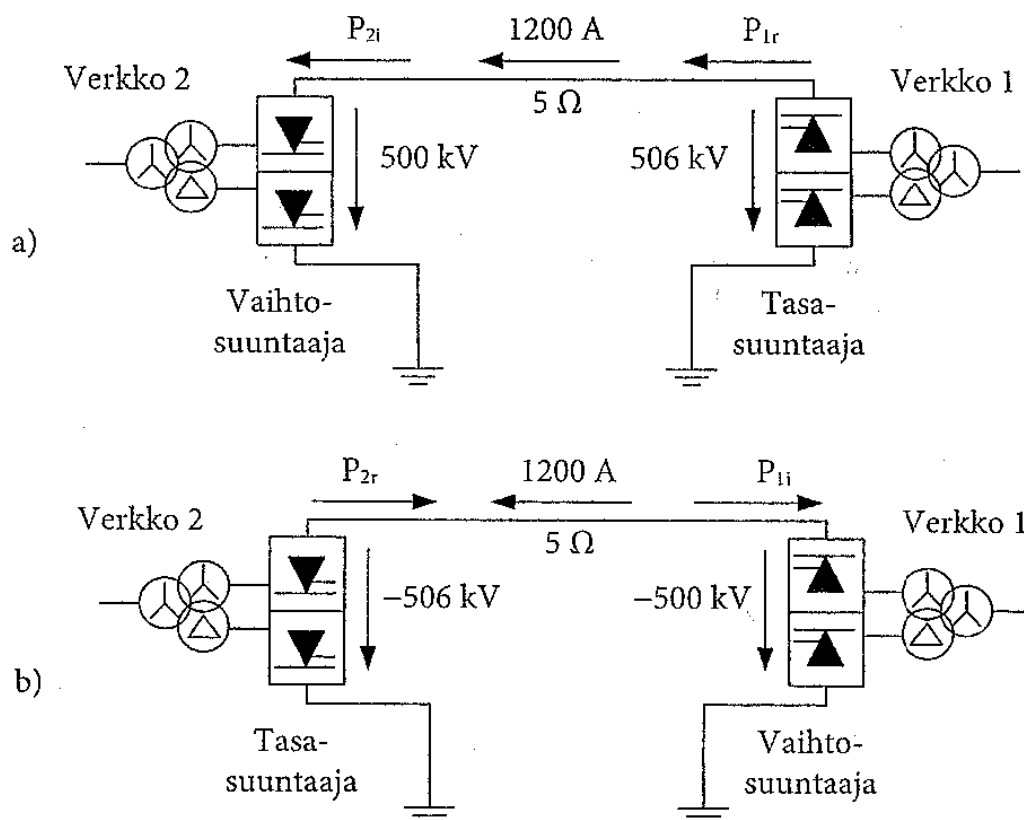
Suuntaajien tehot esimerkiksi kohdassa (a) voidaan laskea kaavoilla 10 ja 11 (Elovaara ja Haarla 2011, 316.):

$$P_{2i} = U_{di} I_d = 500 \text{ kV} \cdot 1200 \text{ A} = 600,0 \text{ MW}$$

$$P_{1r} = U_{dr} I_d = 506 \text{ kV} \cdot 1200 \text{ A} = 607,2 \text{ MW}$$

Havaitaan, että häviöteho tulee tasasuuntaajan päästä. Tässä esimerkissä se on 7,2 MW. Häviöteho voidaan myös laskea erikseen kaavalla (Elovaara ja Haarla 2011, 317.):

$$I_d^2 R_L = 1200 \text{ A}^2 \cdot 5 \Omega = 7,2 \text{ MW} \quad (23)$$



KUVIO 32. Esimerkki tehon siirtymisestä suuntaaja-asemien välillä. (Elovaara ja Haarla 2011.)

4.5.1 Vakiotehosäätö

Tasasähköyhteyden tehonsäädössä on yleensä käytössä vakiotehosäätö. Suuntaaja-asemien välillä on oltava tällöin tietoliikenneyhteys. Vakiotehosäädössä verkon käyttäjältä tulee yhteydelle teho-ohje ja käyttäjä määrää tehon. Säätojärjestelmässä tämä ohje asetetaan tasasuuntaajan virtaohjeksi. Yleensä vakiotehosäädössä vaihtosuuntaaja hallitsee jännitettä. Tasasuuntaaja asettelee ja päättää virran, sekä sen ohjauskulma toimii sallittujen arvojen välillä. Kuviossa 33 pisteen A kohdalla on normaalitilanteen toimintapiste, jossa tasa- ja vaihtosuuntaajan ominaiskäyrät ovat samassa kohdassa. Pisteessä E on tasasuuntaajan jännite tällöin. Tasasuuntaajan toimintakuvaaja on piirretty ehjällä viivalla ja vaihtosuuntaajan pisteviivalla. Muuntajien käämikytkimien ja ohjauskulmien muuttamisella tapahtuu yleensä vakiotehosäätö. Yleensä vakiotehosäädössä tasasuuntaajan virta liikkuu alueella E-A-F ja vaihtosuuntaajan jännite alueella C-A-D. Normaalisti

Vakiovirtasäädössä tasasuuntaajan virtaohje on ΔI_d :n verran suurempi kuin vaihtosuuntaajan saama virtaohje. Vaihtosuuntaaja pystyy toimimaan ilman virtaohjettakin, mutta sille annetaan se silti. (Elovaara ja Haarla 2011, 319-320.)

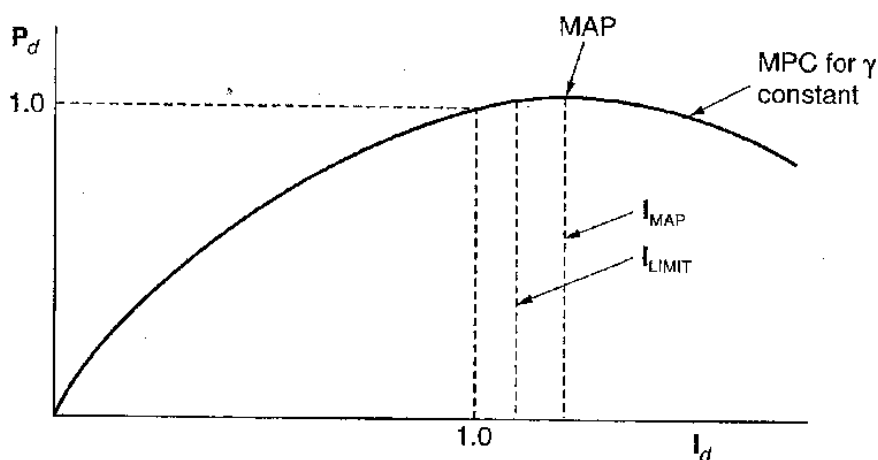
4.5.3 Hätätehonsäätö

Kuviossa 33 on kuvattu myös vaihto- ja tasasuuntauspään jänniteriippuva virtaohje, englanniksi voltage dependent order limiter (VDCOL), jota käytetään vaihtojänniteverkkojen häiriöiden aikana. Säätö on erittäin olennainen heikoille verkoille. Häiriö voi olla esimerkiksi vaihtojännitteen lasku olennaisesti. Vaihtosuuntaajan toimintakäyrä on katkoviivalla piirretty ja tasasuuntaajan ehjällä viivalla. Toimintaperiaate on, että verkon jännitettä pyritään kasvattamaan laskemalla siirtotehoa. Siirtotehon lasku laskee myös loistehon kulutusta. Tasasähköyhteys pystyy reagoimaan automaattisesti ja joutuisasti taajuuden muutoksiin ennen säätäjiä, jotka ohjaavat turbiineja. Alitaajuustilanteissa Nordel suosittaa, että tasasähköyhteyden lyhytaikainen häiriöreservi voi olla 1000 MW/Hz ja hätätehonsäädössä enintään 1200 MW/Hz. Sähkön tuonti voidaan katkaista, jos taajuus Suomen verkossa on puolen sekunnin ajan yli 52 Hz. (Elovaara ja Haarla 2011, 320, 330.)

Tasasähköyhteydellä yhdistettyjä verkkoja pystytään avustamaan poikkeavissa häiriötilanteissa, koska tehoa voidaan säätää ja suunta kääntää pikaisesti. Esimerkiksi tuotantoyksikön irrotuksesta johtunut tehovajaus voidaan paikata nopeasti. Pienentämällä ensimmäisen heilahduksen amplitudia, voidaan transienttista stabiilisuutta kasvattaa ripeällä hätätehonsäädöllä (0,5 sekunnin sisällä). Jännitestabiiliuden ollessa rajoittavana tekijänä eräillä sijainneilla, voidaan tehonsiirtokykyä nostaa hitaalla säätämisellä (10–20 sekunnin sisällä). Hätätehonsäädön laukaisee verkosta tulevat aktivoivat signaalit. Tällaisia signaaleja ovat tietyn katkaisijan avautuminen, siirtoteho ja jännite. Hätätehonsäädössä etukäteen määriteltujen toimintojen mukaisesti säädetään tasasähköyhteyden tehoa. Etukäteen määritellyt toiminnot ovat nopeus, jolla tehoa muutetaan ja viive toiminnossa. (Mörsky 1994, 229.)

4.5.4 Maksimiteho

Jos oletetaan, että virta säätyy itsestään ohjearvoon heti ja vaihtosähköjärjestelmän sähkömagneettinen kenttä, vaihtosuuntaajan sammutuskulman minimi γ ja muuntajan käämikytkin pysyvät muuttumattomina. Siirrettävästä tehon ja virran suhteesta voidaan muodostaa käyrä, jota kutsutaan maksimitehokäyräksi, englanniksi maximum power curve (MPC). Kuviossa 34 on esitetty käyrä, jossa on suurin mahdollinen saatavissa olevan tehon, englanniksi maximum available power (MAP) piste virralla I_{MAP} . Tasavirran kasvattaminen tämän pisteen ohitse laskee jännitettä enemmän suhteessa virran nousuun. Tämä Johtaa siihen, että teho lopulta pienenee. Samantyyppinen käyrä on mahdollista luoda myös tasasuuntaajalle minimiohjauskulmalla α . Tehonsiirron kannalta on ajateltu, että tasasuuntaajalla ei olisi mitään rajaa virransyöttämisessä nimellisjännitteellä. (Arrillaga 1998, 32.)



KUVIO 34. Tasasähköyhteyden tasavirran dP_d/dI_d käyrä minimisammutuskulmalla γ . (Arrillaga 1998.)

Tehon kasvaessa myös loistehon kulutus kasvaa. Loistehon kulutuksen kasvu taas laskee jännitettä vaihtosähköpuolella. Jännitteen laskeminen vaihtosähköpuolella vaikuttaa erityisesti loistehon tuottaviin kondensaattoreihin, joiden loistehon tuotto on suhteellinen jännitteen neliöön. Heikossa sähköverkossa vaihtosähköpuolen jännite voi laskea huomattavasti. Tällöin tasavirran kasvattaminen pienentää tasasähköyhteyden siirtotehoa,

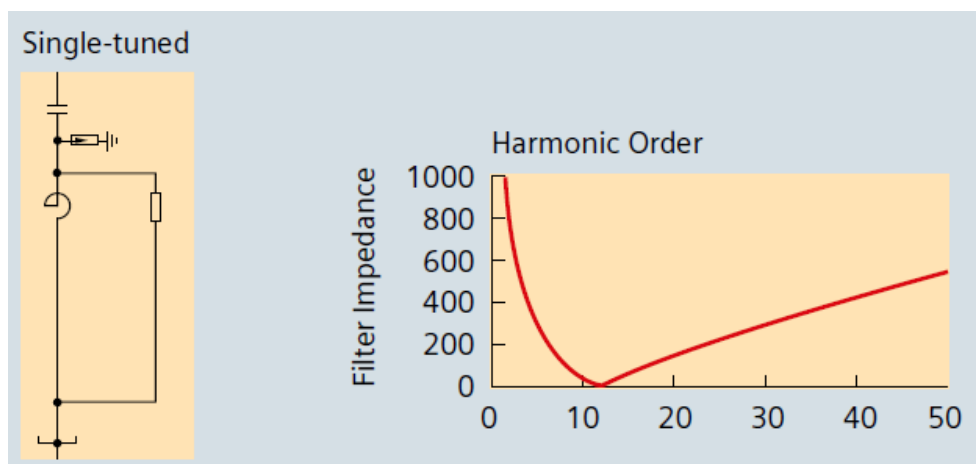
kun loistehoa ei voida kompensoida vaihtosähköverkossa tarpeeksi ja tasajännite laskee enemmän virran nousuun nähden. (Elovaara ja Haarla 2011, 323.)

4.6 Yliaaltojen suodatus

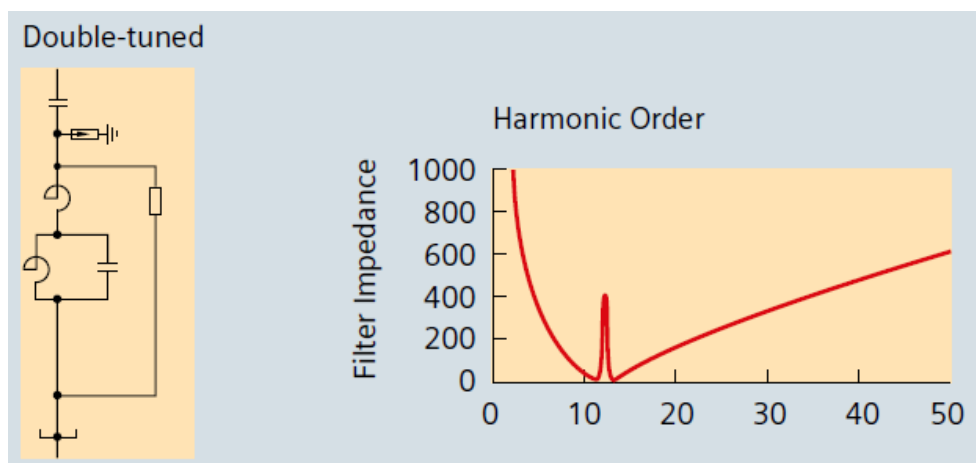
Yleensä epäkarakteristiset yliaallot ovat niin vähäisiä, ettei niitä erikseen suodateta. Normaalisti isommat taajuudet poistetaan laajakaistaisella suodattimella ja harmoniset yliaallot imupireillä. Paikalliset suodatusvaatimukset vaikuttavat niiden mitoittamiseen. Tasasähkösuodatin ei välttämättä ole tarpeen, jos tasavirran yliaallot saadaan tarpeeksi alhaisiksi tasoituskuristimella. Avojohtoilla tasasähkösuodatin kuitenkin normaalisti tarvitaan, etteivät puhelinhäiriöt menisi sallittujen tasojen yli. Vaihtosähköpuolen suodattimet ovat monimutkaisempia kuin tasasähköpuolen suodattimet. (Mörsky 1994, 224,228-229.)

Liialliset virtayliaallot on suodatettava, koska ne aiheuttavat ylimääräisiä tehohäviöitä, ylikuumenemista, jännitteen säröytymistä ja esimerkiksi puhelinhäiriöitä. Loogisin paikka näiden suodattamiseen on itse lähteessä. Alimpia yliaaltoja pystytään kumoamaan kasvattamalla suuntaajan pulssilukua. Pulssiluvun kasvattamisesta olisi kuitenkin se haitta, että muuntajien lukumäärä lisääntyisi ja kytkennät vaikeutuisivat. Myös muuntajan eristysten kanssa tulisi ongelmia, koska niitä on vaikea eristää kestävästi vaihtojännitteen lisäksi suuria tasajännitteitä. Pulssiluku 12 on saavutettavissa järkevin keinoin. (Arrillaga 1998, 56-57.)

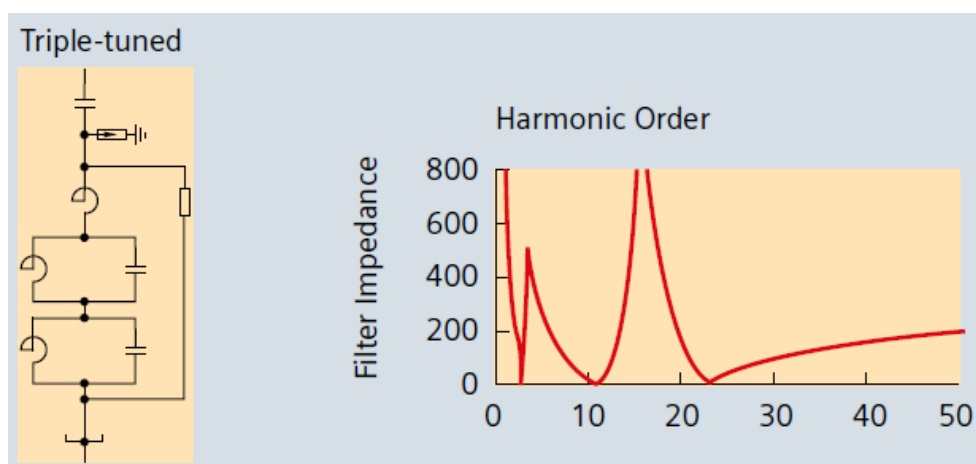
Vaihtosähköpuolella karakteristiset yliaallot ovat suurimpia virtayliaalloista, joita halutaan suodattaa. 3. yliaalto johtuu enimmäkseen vaihtosähköpuolen negatiivisen jakson komponentista ja se halutaan monissa tapauksissa suodattaa. Kuvioissa 35, 36 ja 37 on esitetty eri suodatintasoja. Jänniteyliaaltojen vähentäminen hyväksyttävälle tasolle edellyttää yliaaltosuodattimen pystyvän antamaan siihen liittyvään yliaaltoon riittävän pienen impedanssin. Kuvioissa vaaka-akselilla on yliaallon järjestysluku ja pysty-akselilla on impedanssi. Yliaaltojen suodattamisen kriteerit riippuvat paikallisista olosuhteista ja säännöksistä. (Siemens AG 2011, 22-23.)



KUVIO 35. Yliaaltosuodatin yhdelle yliaallolle. (Siemens AG 2011.)

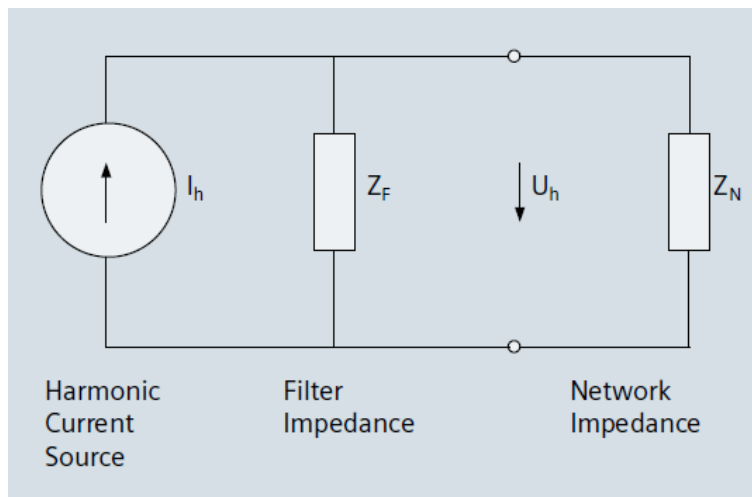


KUVIO 36. Yliaaltosuodatin kahdelle yliaallolle. (Siemens AG 2011.)



KUVIO 37. Yliaaltosuodatin kolmelle yliaallolle. (Siemens AG 2011.)

4.6.1 Vaihtosähköpuolen yliaaltojen suodatus



KUVIO 38. Ekvivalenttipiiri vaihtosähköpuolen jänniteyliaaltojen ja virtayliaaltojen laskemiseen. (Siemens AG 2011.)

Harmonisen laadun kriteeri liittyy yleensä yliaaltojännitteeseen suuntaaja-aseman kiskossa. Harmonisen laadun määrittämiseen voidaan käyttää hyödyksi ekvivalenttipiiriä kuviossa 38. Suodattimien mitoituksessa on otettava huomioon verkon impedanssi, koska muuten voi aiheutua rinnakkaisresonanssi verkon ja suodattimen välillä. Tämä resonanssi voi aiheuttaa yliaaltojen ei-toivottua kasvamista alueilla, joilla suodattimet eivät vaikuta. On kuitenkin epärealistista ajatella, että rinnakkaisresonanssi voisi tapahtua kaikilla taajuuksilla. Kokonaissäröytymisen ja TIF-arvon laskelmissa on riittävää tarkastella kahta yksittäistä maksimia resonanssilaskelmista ja vaihtosähköverkko oletetaan avoimeksi lopuille virtayliaalloille. (Siemens AG 2011, 22-23.)

Puhelinhäiriökerrointa, englanniksi telephone interference factor (TIF) ja puhelinyliaaltojen muotokerrointa, englanniksi telephone harmonic form factor (THFF) käytetään arvioimaan odotettuja häiriöitä analogisiin puhelinjärjestelmiin. Näitä häiriöitä aiheuttaa virtayliaalloista, jotka pääsevät vaihtosähköpuolen avojohtoihin. Nykyiset digitaaliset puhelinjärjestelmät ovat kuitenkin immuuneja näille häiriöille ja tästä syystä tämä tarkastelu on monesti aika turhaa. (Siemens AG 2011, 23.)

Suodattimen koko määritellään loistehona, jonka suodatin tuottaa nimellistaajuudella. Suuntaajan loistehon tarpeen mukaan määritellään suodattimien koko ja muilla taloudellisesti järkevillä keinoilla tuotetaan loput loistehon tarpeesta. Viritystarkkuudella ilmaistaan suodattimen laatu ja se määritellään erilaisilla ylipäästösuodattimille ja säädettäville suodattimille. Ylipäästösuodattimia käytetään yleensä suodattamaan järjestyslukua 17 suurempia yliaaltoja. (Arrillaga 1998, 58-59.)

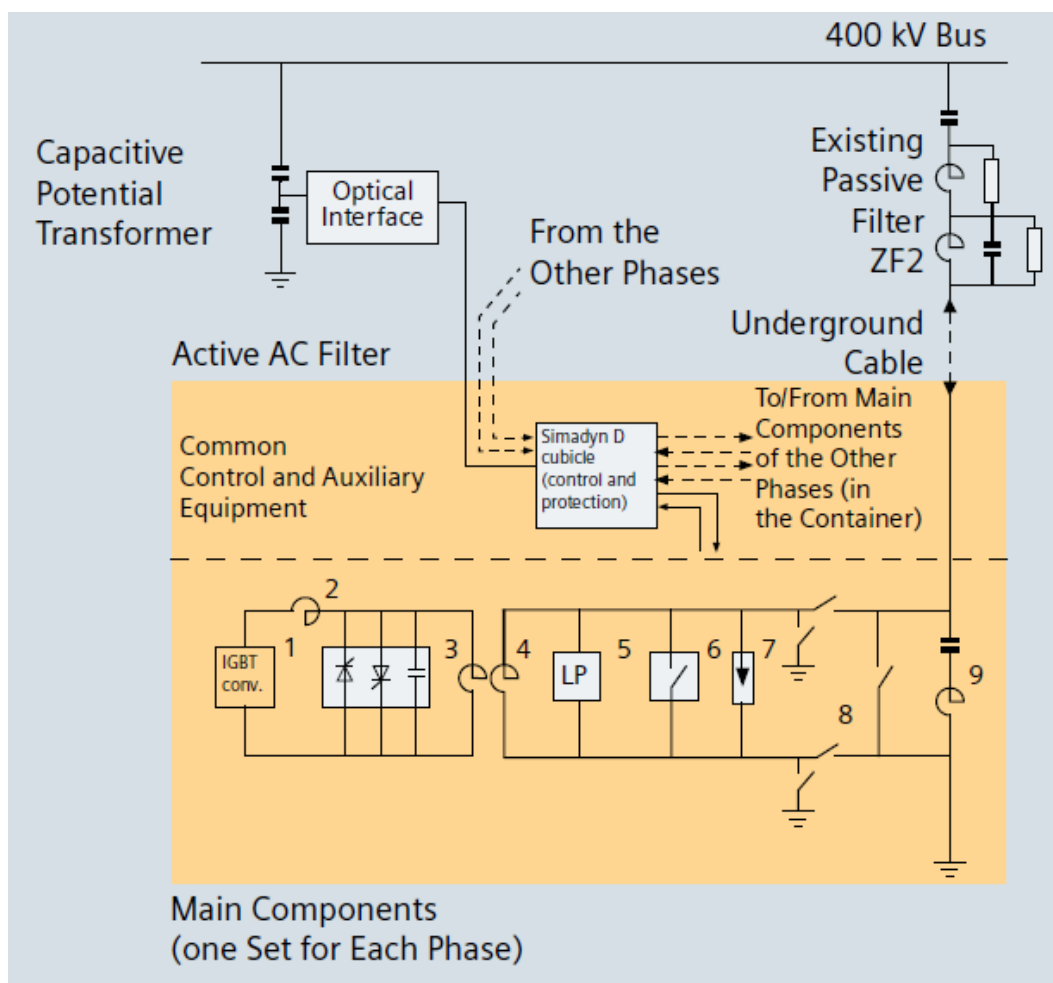
4.6.2 Tasasähköpuolen yliaaltojen suodatus

Tasasähköyhteys voi aiheuttaa häiriöitä johdon viereiseen puhelinjärjestelmään. Tasoituskuristimesta huolimatta tasasähköjohdolla esiintyy suuritaajuisia vaihtovirtaa, koska tasasähköpuolen jänniteyliaallot aiheuttavat vaihtovirtoja, jotka ovat päällekkäin tasavirran kanssa tasasähköjohdolla. Näitä ongelmia voidaan vähentää suodattimilla, jotka kytketään rinnakkain suuntaaja-aseman navan kanssa. Suodattimen tyyppejä on useita. Yhdelle tai useammalle yliaallolle säädetyt suodattimet ovat yleisiä. Ne voivat olla ylipäästö ominaisuudella tai ilman. Monopolaarisessa yhteydessä häiriöt ovat merkittävästi suuremmat kuin bipolaarisessa yhteydessä. Häiriövirtojen intensiteetti riippuu vahvasti suuntaajan toimintatilasta. (Siemens AG 2011, 25.)

4.6.3 Aktiivinen yliaaltosuodatin

Aktiivisella yliaaltosuodattimella voidaan täydentää passiivisten suodattimien toimintaa. Laite asennetaan olemassa olevan passiivisen suodattimen jatkoksi. Aktiivisen suodattimen huoltamisen aikana se voidaan ohittaa, jolloin passiivista suodatinta voidaan käyttää normaalisti suodattamisessa. Laitteiston sarjaan kytkentä rajoittaa sen aktiivisen osan transienttista rasitusta ja jännitetasoa. Laitteisto voidaan asentaa tasa- tai vaihtojännitepuolelle. Aktiivinen laitteisto hyödyntää IGB -transistoreilla toteutettua jännitelähdesuuntaajaa nopealla kytkentätaajuudella. Sillä tuotetaan jopa noin 700 voltin jännitepiikkejä, jotka sisältävät korkeiden yliaaltojen järjestyslukuja. Näiden yliaaltojen järjestysluku on jopa 50. Järjestelmän idea on muodostaa saman amplitudin yliaaltoja

verkkoon, jotka ovat vastakkaisia suuntaajan tuottamiin yliaaltoihin nähden. Näin yliaallot kumoutuvat ennen verkkoon pääsyä. Nopea suojaus- ja tarkkailujärjestelmä muodostaa pulssit laitteistolle verkon jännite ja virtatiedoista. Jännitelähde on kytketty muuntajan kautta, jonka avulla saavutetaan vaadittu erotus laitteistojen välille. Muuntajan Jännite- ja virtataso vastaavat suuntaajan antamaa jännitettä. Kuvion 39 mukainen kaavio voidaan piirtää jokaiselle vaiheelle. Siemens toimittaa laitteiston kätevässä helposti liikuteltavassa kontissa. (Siemens AG 2011, 26-27.)

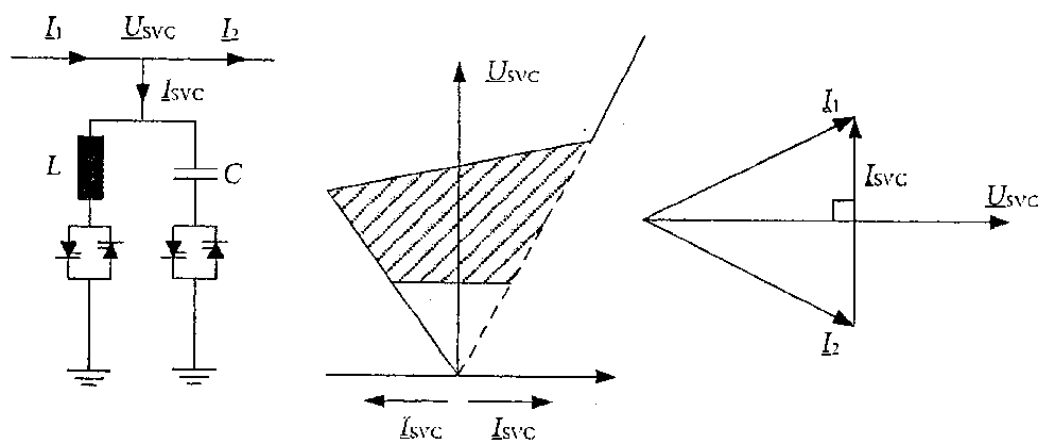


KUVIO 39. Kaavio yksittäisestä aktiivisesta vaihtosähköpuolen suodattimesta. 1. IGBT – jännitelähdesuuntaaja, 2. kuristin induktiiviseen mukautukseen, 3. tyristori, 4. muuntaja, 5. matalapäästösuodatin, 6. tyhjiökytkin, 7. ylijännitesuoja, 8. eristimet ja maadoituskytkin, 9. piiri poikkeavien 50 Hz taajuisten virtojen tunnistamiseen. (Siemens AG 2011.)

4.7 Loistehon kompensointi

Yleisin vaatimus suuntaaja-asemalle on loistehon täysin tai ylikompensointi nimellisteholla. Loistehon kulutus riippuu suuntaajan muuntajan reaktanssista, pätötehosta ja ohjauskulmasta. (Siemens AG 2011, 22.)

4.7.1 Staattinen loistehon kompensaattori

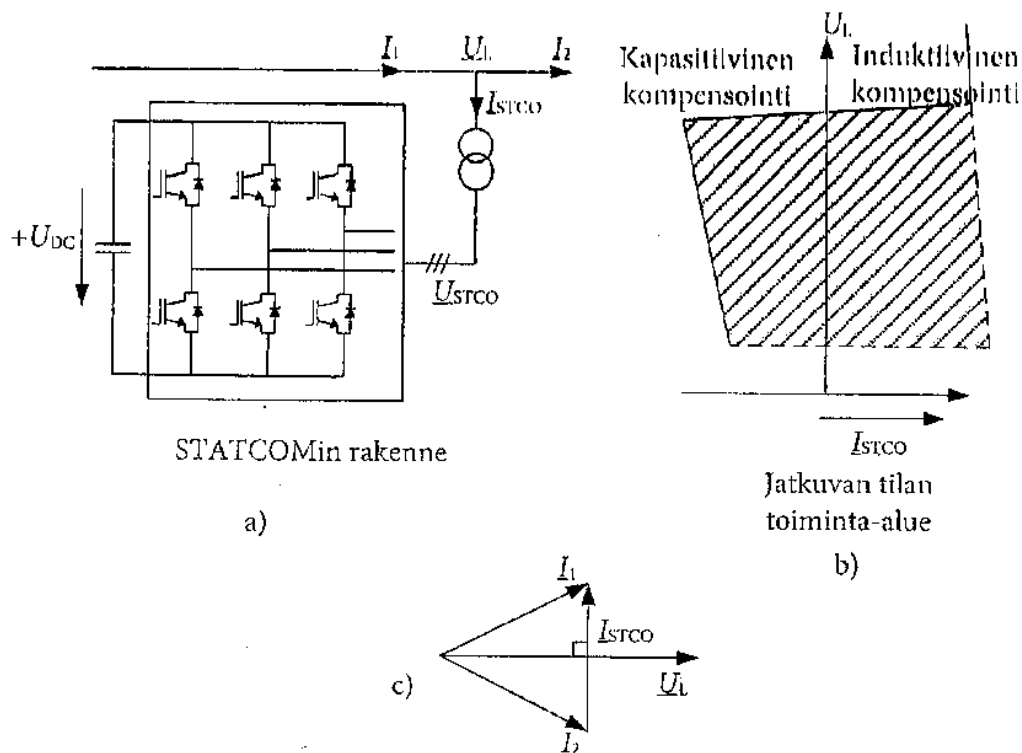


KUVIO 40. SVC -laitteisto, toiminta-alue jatkuvassa tilassa ja osoitindiagrammi

Staattisen loistehon kompensaattorin, englanniksi static var compensator (SVC) kytkennässä kuviossa 40 nähdään kela ja kondensaattori rinnakkain. Kytkennässä voi olla myös pelkkä kondensaattori kelan rinnalla, jossa vain kela ohjataan tyristoreilla. Tyristoreja ohjaamalla pystytään staattisen kompensaattorin reaktanssia säätämään. Staattinen loistehon kompensaattori voi vaikuttaa sähköverkon jännitteeseen loistehon kuluttamisella tai tuottamisella. Kondensaattorin ja kelan rinnankytkennän vuoksi susceptanssille voidaan kirjoittaa yhtälö $B_{SVC} = j(\omega C(t) - 1/\omega L(t))$. Kondensaattorin ja kelan susceptanssin suuruuksista riippuu loistehon kulutus tai tuotto. Perusyhtälö SVC -laitteelle on (Elovaara ja Haarla 2011, 337-339.):

$$I_{SVC} = jU_{SVC} \cdot B_{SVC} \quad (24)$$

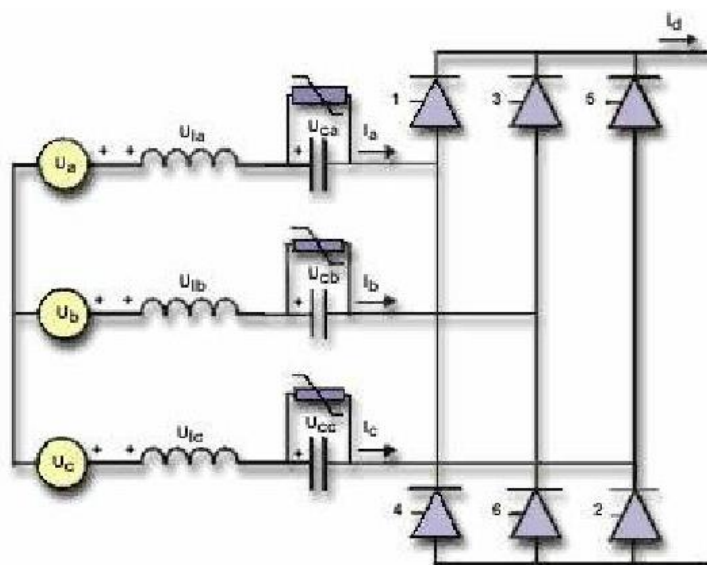
4.7.2 STATCOM



KUVIO 41. STATCOM – laitteisto, toiminta-alue jatkuvassa tilassa ja osoitindiagrammi.

Staattista synkronikompensaattoria, englanniksi static synchronous compensator (STATCOM) on mahdollista käyttää loistehon kompensointiin. Laite koostuu jännitelähdesuuntaajasta ja se on säädeltävä rinnakkaiskompensointi, johon ei vaikuta sähköverkon jännite. Laite voi tuottaa tai kuluttaa loistehoa. Laitteessa on tasajännitepiiri ja puolijohdekytkimistä muodostettu siltakytkentä, joka on itsekommutoivaa tyyppiä. Tasajännitepiiri voi olla esimerkiksi kondensaattori. Jännitettä $U_{STATCOM}$ voidaan säätää, koska puolijohdekytkimiä pystytään sammuttamaan ja sytyttämään halutussa tahdissa. Kuviossa 41 STATCOM – laitteisto.

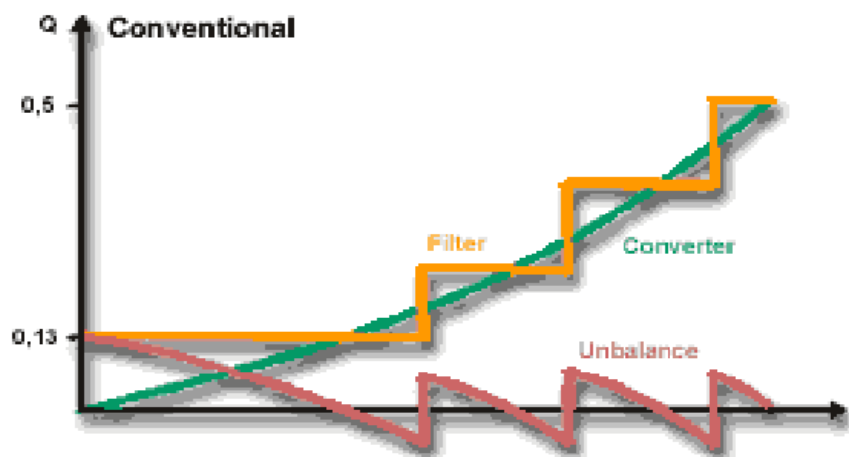
4.7.3 Kondensaattorikommutoidut suuntaajat



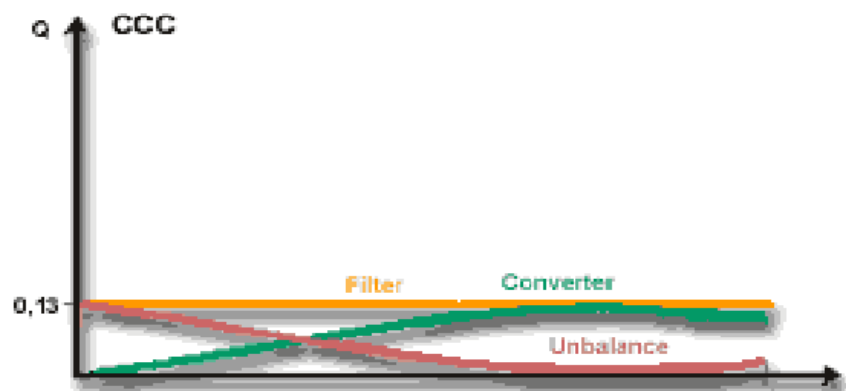
The CCC main circuit configuration

KUVIO 42. ABB:n CCC – järjestelmä

Kondensaattorikommutoituja suuntaajia, englanniksi capacitor commutated converters (CCC) käytetään ABB:n kehittämässä järjestelmässä, jossa muuntajan ja tyristorisillan välissä on kommutointikondensaattorit. Tästä sijoituspaikasta on se etu, että kippivärähtelyn riskiä ei ole, muuntajan kokoa voidaan pienentää loistehon kompensoinnin tapahtuessa ennen muuntajaa ja kytkennässä suuntaaja ohjaa kondensaattorien virtaa, ylivirtoja ja jännitettä. Kondensaattorit rasittuvat tässä kohdassa myös paljon vähemmän ja kondensaattorien ylijännitteet voidaan suodattaa varistorilla. Kuviossa 42 on esimerkkikaavio komponenttien sijoittamisesta. CCC:llä ei tarvita erikseen loistehon mukaisesti kytkeytyviä rinnakkaiskondensaattoriparistoja tai suodatinparistoja. Kuvioissa 43 ja 44 on vertailtu perinteisen ja CCC – tekniikan loistehon kompensointia. (ABB 2008, 1-2.)



KUVIO 43. Loistehon kulutus ja sen kompensointi perinteisellä tekniikalla. Unbalance kuvaa systeemin tasapainoa, Converter suuntaajaa ja Filter suodattimen toimintaa.

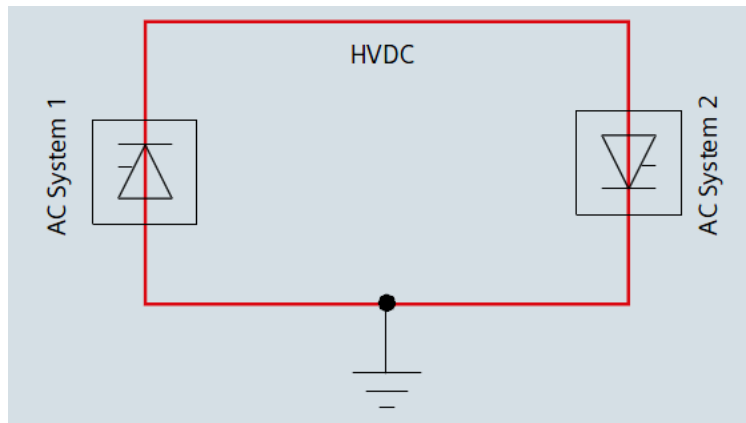


KUVIO 44. Loistehon kulutus ja sen kompensointi ABB:n CCC -järjestelmällä. Unbalance kuvaa systeemin tasapainoa, Converter suuntaajaa ja Filter suodattimen toimintaa.

4.8 Tasasähköyhteydet

4.8.1 Back-to-back -yhteys

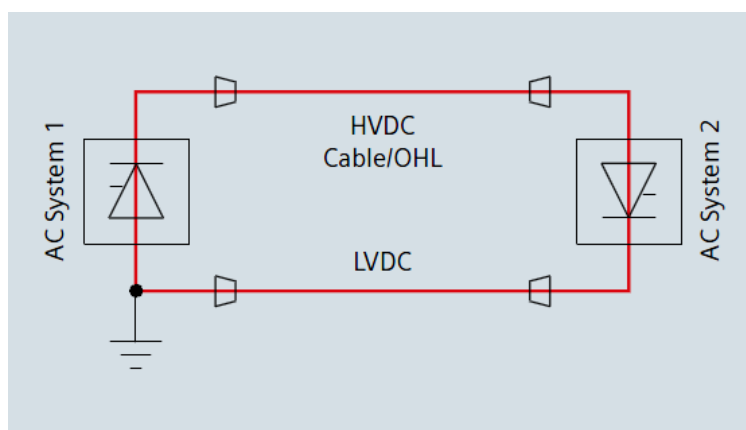
Back-to-back -järjestelmässä tasa- ja vaihtosuuntaaja sijaitsevat samassa laitoksessa. Järjestelmää hyödynnetään mm. kahden eri vaihtojänniteverkon välillä, joita ei voida synkronoida toimimaan yhdessä. Niitä voidaan hyödyntää myös silmukkaverkoissa. (Siemens AG 2011, 6.)



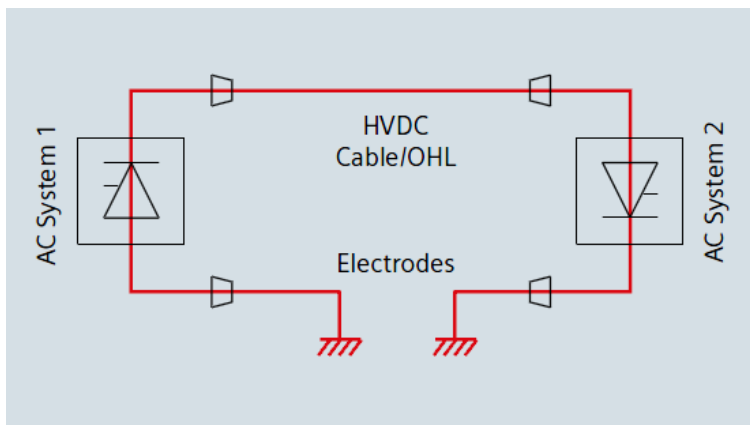
KUVIO 45. Back-to-back -yhteys (Siemens AG 2011.)

4.8.2 Monopolaarinen yhteys

Monopolaarisessa yhteydessä on vain yksi johdin ja virran paluureittinä pystytään käyttämään merta, metallia tai maata. On kuitenkin havaittu, että maan tai meren käyttäminen virran paluureittinä saattaa tuottaa häiriöitä kompasseihin, korroosio vaikeuksia suuntaaja-asemien lähetyvillä ja ongelmia ekosysteemeille. Asioista päättävät virkamiehet eivät haluaisi sallia meren tai maan käyttämistä virran paluureittinä. Tästä syystä joudutaan usein asentamaan paluujohdin. (Elovaara ja Haarla 2011, 310.)



KUVIO 46. Monopolaarinen yhteys metallisella paluujohtimella (Siemens AG 2011.)



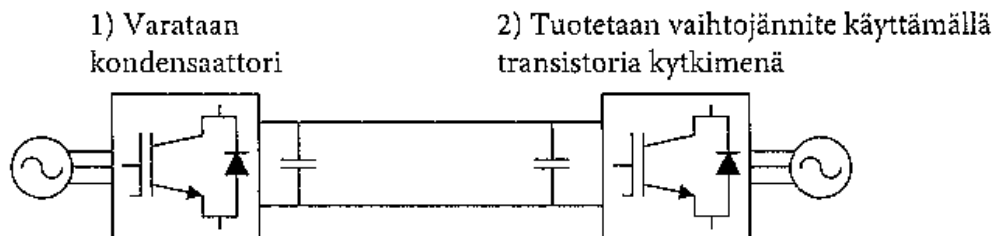
KUVIO 47. Monopolaarinen yhteys maa/meri virran paluureittinä (Siemens AG 2011.)

Maadoituselektrodien maadoitusresistanssi vaikuttaa tehohäviöihin paljon. Tästä syystä sen struktuuri kannattaa suunnitella kunnolla. Esimerkiksi Fenno-Skan yhteydellä Ruotsin puoleinen pää (anodi) on toteutettu meren pohjaan upotetuilla titaaniverkoilla, joita on 40 kappaletta 1,5 m x 20 m kokoisina paloina. Suomen päässä (katodi) on mereen upotettu kuparisilmukka, jonka maadoitusresistanssi on 0,11 Ω . Ruotsin puoleinen maadoitusresistanssi on 0,2 Ω . (Mörsky 1994, 225.)

4.8.3 Bipolaarinen yhteys

Bipolaariyhteydessä molemmalla suuntaaja-asemalla on kaksi napaa. Bipolaariyhteys voidaan nähdä kahtena monopolaariyhteytenä rinnakkain. Bipolaariyhteyden napojen sillat ovat sarjassa, mutta niiden välissä on maadoitus. Molempien napojen ollessa käytössä maihin ei johdu juuri ollenkaan virtaa. Olettaen, että molempien siltojen ominaisuudet ovat samat. Usein ensin rakennetaan monopolaariyhteys, joka myöhemmin muutetaan bipolaariseksi yhteydeksi toisella kaapelilla. (Elovaara ja Haarla 2011, 310-311.)

5 TASASÄHKÖYHTEYS JÄNNITELÄHDESUUNTAAJALLA

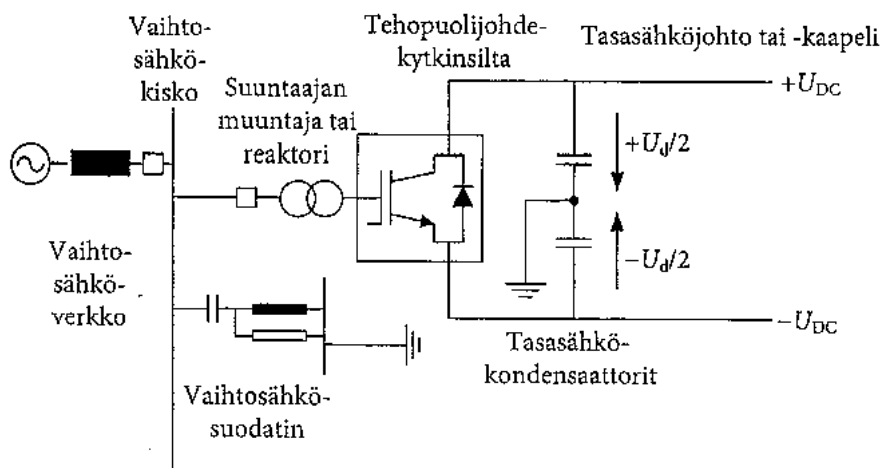


KUVIO 50. IGB -transistoreilla toteutettu tasasähköyhteys (Elovaara ja Haarla 2011.)

Jännitelähtesuuntaajalla, englanniksi voltage source converter (VSC) toteutetussa yhteydessä on aina oltava minimissään kaksi jännitteistä johdinta. Yhteys voi toimia ilman viestiyhteyttäkin asemien välissä ja sähköasema ei vie yhtä paljon tilaa kuin verkkokommutoivan yhteyden asema. Häviöt ovat kuitenkin isommat ja isoin käytettävissä oleva teho ei ole yhtä iso kuin tyristoreilla toteutetussa suuntaajassa. Yhteyden tehon suunta voidaan kääntää vain kääntämällä virran suuntaa, koska jännitteen napaisuus pysyy aina samana. Napaisuus pysyy samana, koska tasasähköpuolella oleva kondensaattori varautuu puolijohdekytkimien avulla. Puolijohdekytkiminä käytetään yleensä IGB -transistoreja. Kondensaattori voidaan varata tiettyyn jännitteeseen. Kuvio 50 nähdään Transistorin rinnalla kytkennässä diodi. Tämän diodin kautta virralle saadaan kulkureitti vastakkaiseen suuntaan. Yhteyden toisessa päässä vaihtojännitteen muodostamiseen on erityyppisiä keinoja. (Elovaara ja Haarla 2011, 325, 328.)

Vaihtosuuntauksessa käytettäviä IGB -transistoreita voidaan kytkeä päälle ja pois verkon vaihtojännitteen hetkellisarvon vaikuttamatta, toisin kuin verkkokommutoivassa tekniikassa. Tällaista kytkentää käyttävät suuntaajat eivät tarvitse verkkojännitettä kommutointiin ja ovat siis itsekommutoivia. Tästä syystä suuntaaja on mahdollista yhdistää heikkoon verkkoon ja sillä voidaan syöttää jännitteetöntä verkkoa tietyin edellytyksin. Yhteyttä pystytään käyttämään meriyhteyksillä, kahden eri vaihtojänniteverkon yhdistämiseen ja todella suurien etäisyyksien yhteyksiin. Toisin sanoen käyttökohteet ovat samat kuin verkkokommutoivallakin yhteydellä. Suurin siirrettävä teho vain on pienempi. Esimerkiksi meritulipuisto voidaan liittää verkkoon jännitelähdesuuntaajaa käyttävällä yhteydellä. Jännitelähdesuuntaajaa kannattaa käyttää varsinkin silloin, kun sähköasemalle on huonosti tilaa tai sillä annetaan jännitetukea heikoille verkoille. Vaihtosuuntaus voidaan toteuttaa esimerkiksi 2-tasoisella pulssinleveysmodulaatiolla tai monitasotekniikalla. (Elovaara ja Haarla 2011, 325-326, 328-329.)

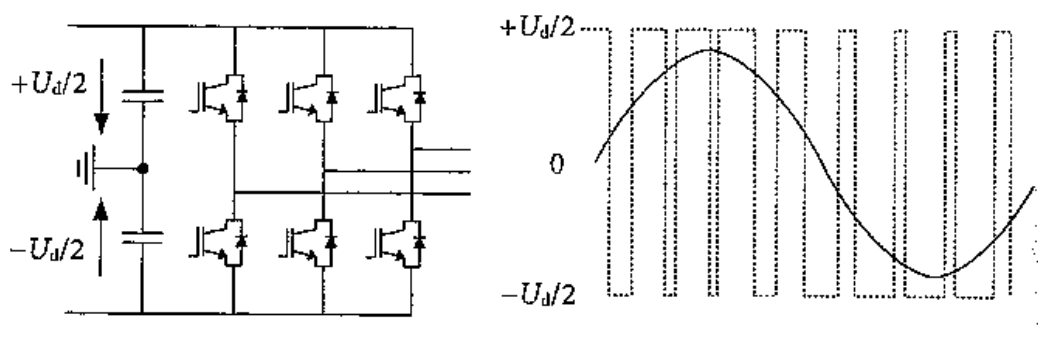
5.1 2-tasoinen pulssinleveysmodulaatio



KUVIO 51. 2-tasoista pulssinleveysmodulaatiota käyttävä suuntaaja-asema (Elovaara ja Haarla 2011.)

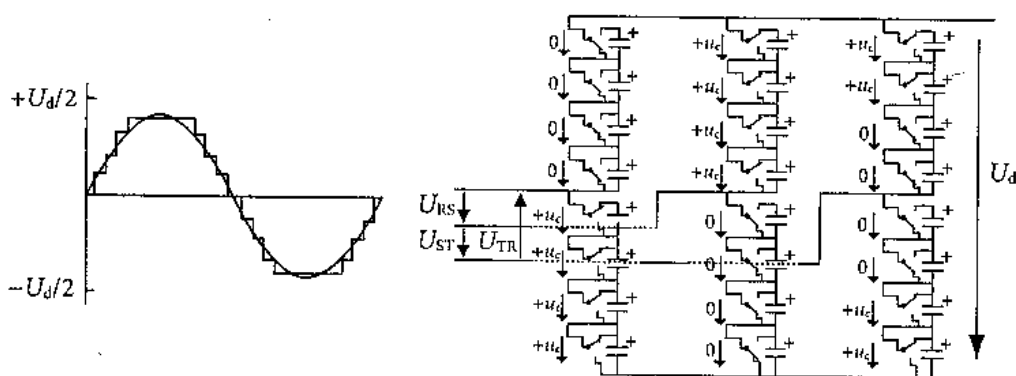
Vaihtojännite voidaan muodostaa käyttämällä 2-tasoista pulssinleveysmodulaatiolla. 2-tasoinen pulssinleveysmodulaatio aiheuttaa paljon yliaaltoja. Kytkentäajankohtia

säätämällä on mahdollista vähentää yliaaltoja, mutta tehohäviöt kasvavat kytkentätaajuuden kasvun mukana. IGB -transistoreista koottu silta ja vaihtojännitteen muodostus pulssinleveysmodulaation avulla on esitetty kuviossa 52. Ehjällä viivalla piirretty siniaalto esittää haluttua vaihtojännitettä ja katkoviivalla piirretyt pylväät transistorien avulla muodostettua vaihejännitettä. Nopea kytkentätaajuus aiheuttaa isoja häviöitä, jotka kasvavat taajuuden noustessa. (Elovaara ja Haarla 2011, 326.)



KUVIO 52. Vaihtosuuntaus 2-tasoisin pulssinleveysmodulaation avulla (Elovaara ja Haarla 2011.)

5.2 Modulaarinen monitasosuuntaus

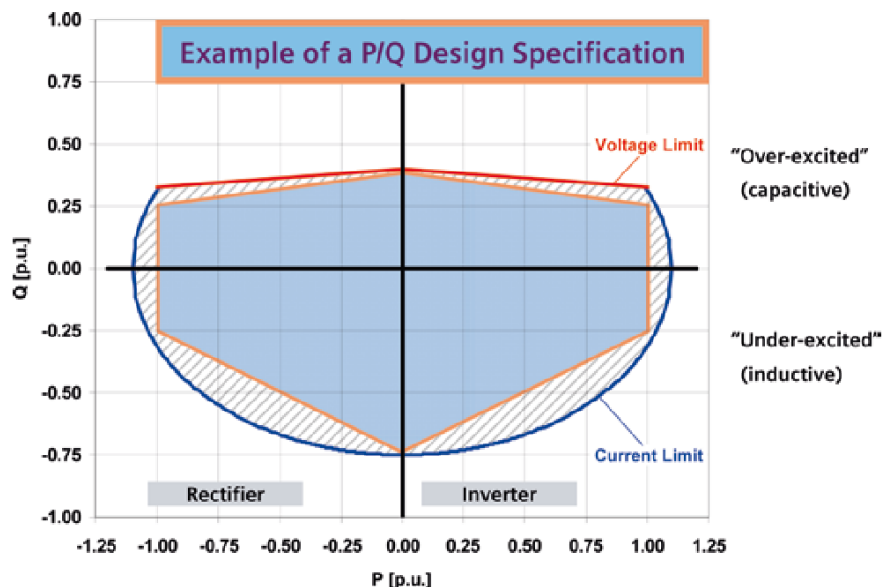


KUVIO 53. Pulssinleveysmodulaatiota hyödyntävä monitasoinen suuntaaja (Elovaara ja Haarla 2011.)

Monitasotekniikalla on mahdollista tuottaa sinimuotoa muistuttavaa aaltoa ja tästä syystä yliaaltoja ei ole niin paljon verrattuna 2-tasotekniikalla toimivaan vaihtosuuntaajaan. Kuviossa 53 on esitetty yhden vaiheen vaihtojännitteen muodostaminen monitasotekniikkaa hyödyntäen. Kuviossa kytkimet esittävät transistoreita. Kytkimien ja kondensaattorien avulla voidaan muodostaa eri jännitetasoja, joita kytkemällä saadaan siniaaltoa lähellä oleva porrasmainen vaihtojännite. Monitasotekniikassa vaihtosuuntaaja on mutkikkaampi. (Elovaara ja Haarla 2011, 327.)

5.3 Yhteyden ominaisuudet

Jännitelähdesuuntaaja aiheuttaa vaihtosähköpuolelle jänniteyliaaltoja ja tasasähköpuolelle virtayliaaltoja. Verkkokommutoiva suuntaaja tuottaa kuitenkin enemmän yliaaltoja molemmille puolille. Suuntaajan kondensaattori toimii myös vaihtosähköpuolelta tulevien yliaaltojen suodattimena. Suodattaminen ei ole kuitenkaan täydellistä, koska kondensaattorin kanssa on myös sarjaan kytkettynä induktanssia. Jännitelähdesuuntaaja pystytään yhdistämään myös heikkoon verkkoon, koska se voi kommutoida ilman vaihtosähköpuolen jännitettäkin. Tästä syystä vikojen aikana tehoa voidaan edelleen antaa verkkoon ja yhteydellä pystytäänkin syöttämään tietyissä tapauksissa jännitettä kylmään verkkoon. Jännitelähdesuuntaajalla toteutetussa yhteydessä lois- ja pätötehoa pystytään hallitsemaan vapaasti molemmalla tasasähköasemalla. Sitä voidaan siis ajatella hitausmassattomana tahtigeneraattorina, jolle voidaan piirtää PQ –diagrammi (Kuvio 54). Suuntaaja syöttää tehoa vaihtosähköverkkoon, kun sen jännitteen kulma on verkon kulmaa edellä. Tällöin se toimii vaihtosuuntaajana. Siirretyn pätötehon suuruus riippuu tämän kulmaeron suuruudesta. Jännitteiden itseisarvojen ero vaikuttaa loistehon suuntaan. Yhteyttä voidaan ajatella loistehon kompensattorina sähköverkolle. (Elovaara ja Haarla 2011, 327-328.)



KUVIO 54. Jännitelähdesuunnatun tasasähköyhteyden tyypillinen PQ -diagrammi. Pystyakselilla yläpuolella kapasitiivinen ja alla induktiivinen. Vaaka-akselilla vasemmalla puolella tasasuuntaaja ja oikealla vaihtosuuntaaja. Sininen viiva on virran raja ja punainen jännitteen raja. (Siemens AG 2011b.)

Verkkokommutoidussa suuntaajassa vikojen aikana voidaan sytytyspulssit estämällä nopeasti katkaista yhteyden toiminta ja mahdollisesti jatkaa, jos kyseessä on väliaikainen häiriö. Jännitelähdesuuntaajan diodista johtuen silta jatkaisi vikavirran syöttämistä häiriöiden aikana, vaikka transistorien toiminta olisi estetty. Tästä syystä yhteys tarvitsee erillisen katkaisijan tasajännitepiiriin ja tämä tekee tehon siirtoon palaamisesta hidasta. (Elovaara ja Haarla 2011, 328.)

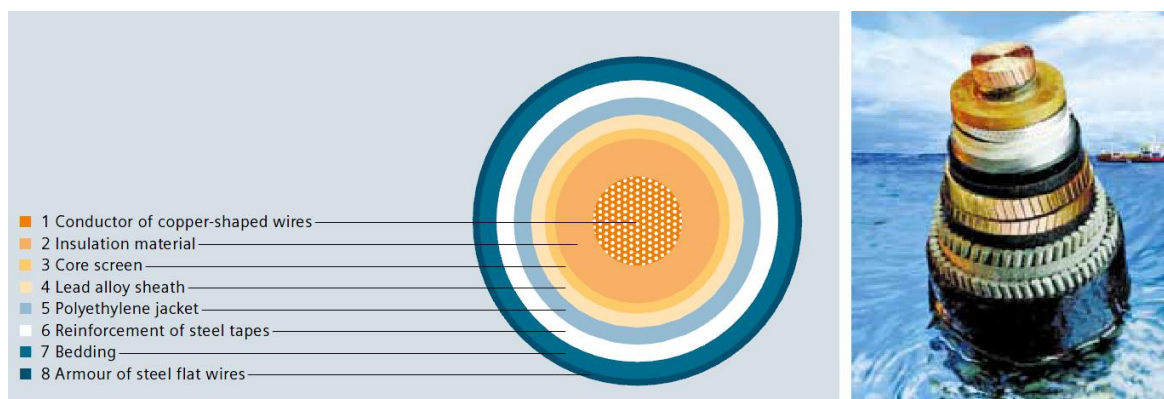
6 TASASÄHKÖYHTEYDEN SIIRTOKAAPELIT

Verkkokommutoidussa tasasähköyhteydessä tehon siirtämiseen käytetään avojohtoja tai öljypaperieristeisiä kaapeleita. Muovikaapeleiden eristys polarisoituisi tasajännitteestä ja tästä syystä ei sietäisi jännitteen polariteetin vaihtumista. Tehon suunnan vaihdossa jännitteen polariteetti olisi käännettävä. Jännitelähdesuuntaajalla toteutetussa tasasähköyhteydessä voidaan käyttää öljy- tai muovi-paperieristeisiä kaapeleita, koska jännitteen napaisuus ei muutu. Ilmajohtoja voidaan myös käyttää, mutta silloin on huomioitava ukkossuojaus suuntaajalaitteistossa. Ilmajohtoa ja muovikaapelia ei käytetä samassa tasasähköyhteydessä, koska salamanisku ilmakaapeliin voisi muuttaa jännitteen napaisuuden hetkellisesti. (Elovaara ja Haarla 2011, 309, 328.)

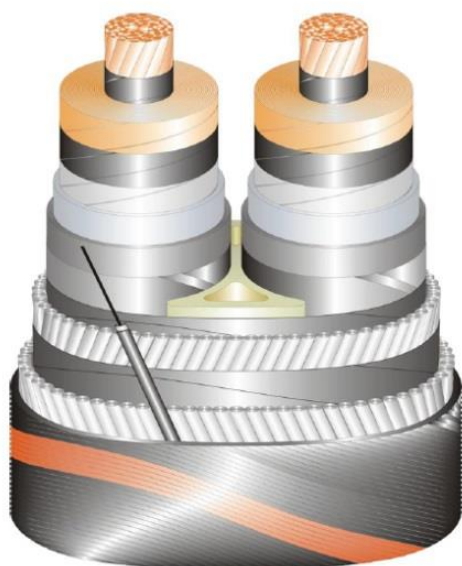
Eristyksen polarisoituminen tapahtuu melko pienessä sähkökentässä. Tasajännite jakautuu eristyksessä resistiviteetin mukaan, toisin kuin vaihtojännitteellä permittiviteetin mukaan. Negatiivisten elektronien tuottama elektronikuori on atomissa olevan positiivisen ytimen ympärillä. Uloin elektronikuori on eristeissä täysi ja niiden energiatilan muuttamisen tarvittava energia on niin iso, että eriste ei kuljeta virtaa helposti. Itse johdin sen sijaan johtaa hyvin virtaa, koska niiden ulompi elektronikuori on tyypillisesti vaillinainen tai viereisen elektronikuoren päällä osin. Siksi varauksenkuljettajia pystyy irrottamaan johteesta vähäinenskin ulkoinen sähkökenttä ja energiatilan vaihtamiseen vaadittu energia on melko pieni. Polarisaatioksi sanotaan ilmiötä, jossa molekyylien palaset ja atomit muuttavat hiukan normaalista asemastaan. Tämän saa aikaan eristyksen saapuminen sähkökenttään, jossa syntyy eri suuntiin vetävä voima molekyylien ja atomien negatiivisiin ja positiivisiin osiin. (Aro 2003, 49-50.)

Kaapelin valinta öljy- tai paperieristeisen välillä riippuu asennustavasta ja käyttökohteesta. Näitä ovat upotussyvyys ja yhteyden pituus. Sähköisesti vakaampia ovat öljyeristeiset kaapelit, mutta sen tehonsiirtoetäisyys rajoittuu vain muutamaan kymmeneen kilometriin. Öljykaapeli tarvitsee paisuntasäiliöt molempiin päihin, koska siinä käytetty öljy on ohutta. Vastaavanlaista tehon siirtämisen rajaa ei ole paperieristeisen kaapelin käyttämisessä, koska niissä käytetty öljy ei valu. (Mörsky 1994, 224.)

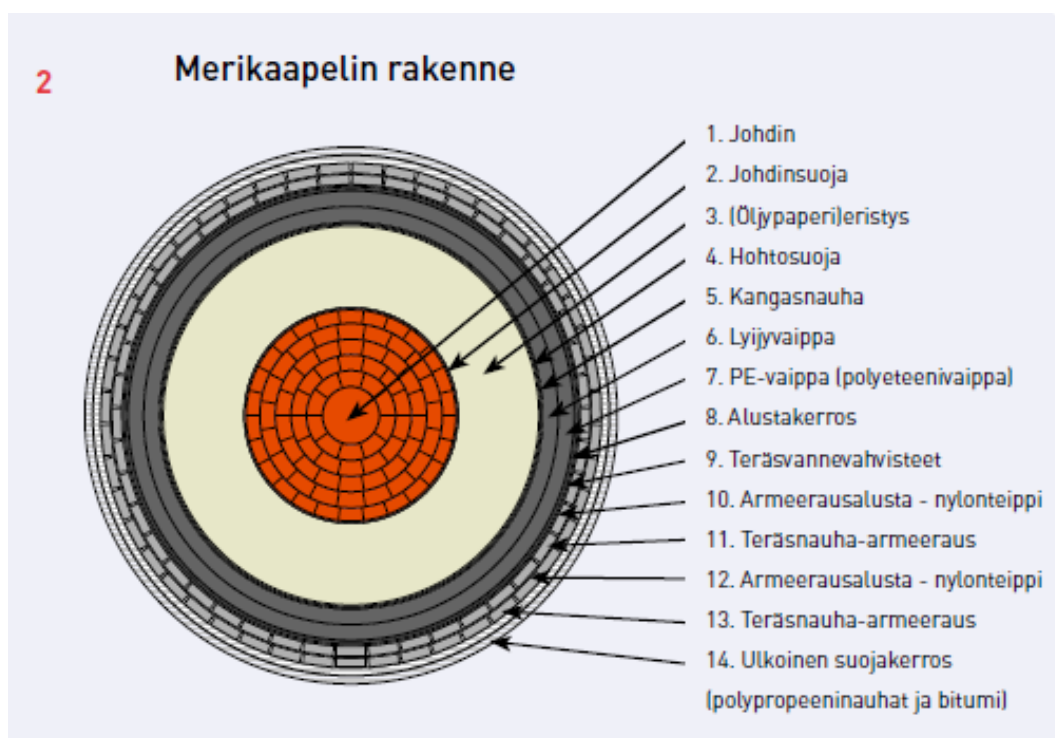
Kuviossa 55 esitetty tyypillinen paperikyllästeinen kaapeli on yleisimmin käytetty kaapeli suuntaajalaitteistojen kanssa. Kaapelilla onkin lähes rajaton siirtoetäisyys teholle ja yhdellä kaapelilla voidaan siirtää jopa 800 MW. Kaapelia on saatavilla 500 kV jännitekestoisuuteen asti. Kaapelissa kuparijohtimet on peitetty öljyllä ja hartsikyllästeisellä paperilla. (Siemens AG 2011, 32-33.)



KUVIO 55. Paperikyllästeisen kaapelin poikkileikkaus. Keskeltä ulospäin kerroksittain luetteluna: 1. Kuparilankajohtimet, 2. eristemateriaali, 3. ydinkerros, 4. lyijyvaippa, 5. polyeteenikerros, 6. teräsvannevahvisteet, 7. päällyste ja 8. teräsnauha-armeeraus. (Siemens AG 2011.)



KUVIO 56. NorNed yhteydellä käytetty kaksoispanssaroitu +/- 450 kV merikaapeli. (ABB 2013.)



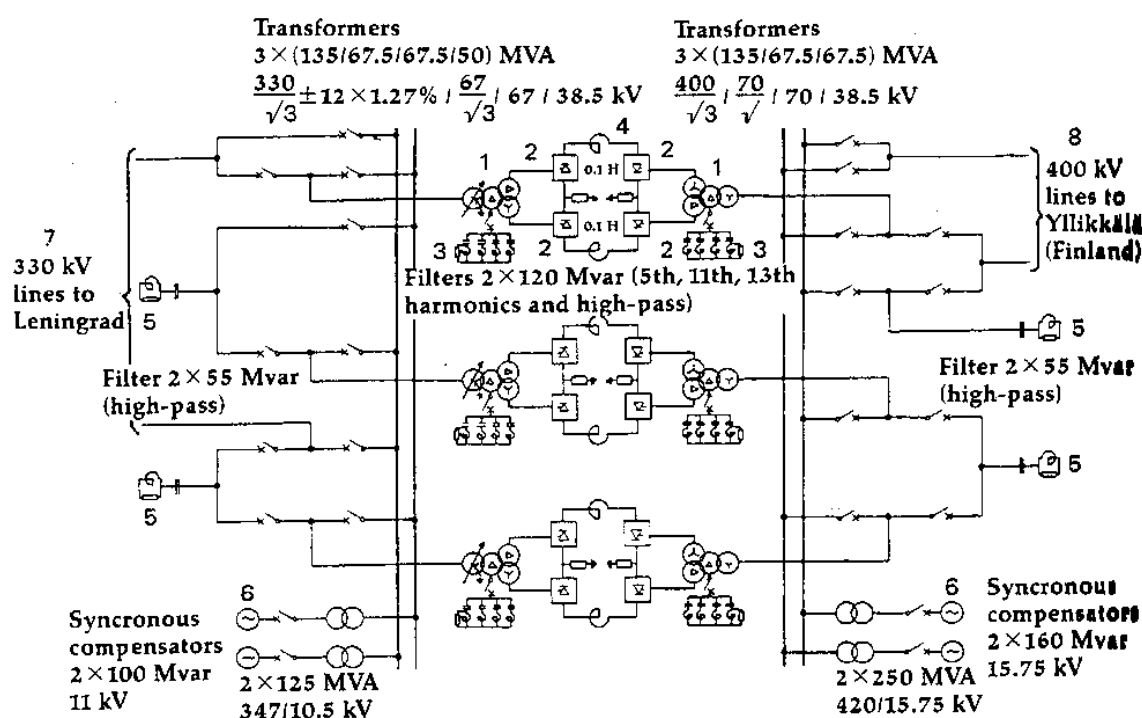
KUVIO 57. Fenno-Skan 2 -yhteydellä käytetty merikaapeli. (Fingrid 2011b.)

Fenno-Skan 2 yhteydellä käytetyn kaapelin tyyppi on NOVA-L 500 kV 1 x 2000 mm² Cu, jonka nimellisjännite on 500 kV ja sen johdinkuparin paksuus 2000 mm². Kaapeli on öljypaperieristeistä tyyppiä, jossa ei ole liukenevia ainesosia. Kaapelin kokonaishalkaisija on 132,2 mm ja sen on valmistanut Nexans Norway AS. Fenno-Skan 2 yhteydellä on merikaapelia 196 km ja avojohtoa 103 km. Hajavirtojen aiheuttamat korroosio-ongelmat maadoituselektrodeista pienenee viidesosaan Fenno-Skan yhteyden muuttuessa bipolaariseksi. Merikaapelin läheisyydessä esiintyy tasasähkön aiheuttama magneettikenttä, joka voi matalassa vedessä vaikuttaa magneettikompasseihin paikallisesti. Sen vaikutus on vastaavanlainen kuin malmiesiintymällä meren pohjassa. Sähkökenttä ei pääse merikaapeliosuudella kaapelista ulos ja vaimenee nopeasti avojohto-osuudella. Ahtojäiden vuoksi merikaapeli on kaivettu lähellä rantaa merenpohjaan. Kaapelin upotussyvyys on noin metri Suomen aluevesillä ja Fenno-Skan kaapeleiden välinen upotusetäisyys on noin 1-2 kilometriä suurimman osan matkasta. (Fingrid 2011b, 2-4.)

7 SUOMEN TASASÄHKÖYHTEYDET

Viipurin linkki on vanhin Suomeen yhdistetty tasasähköä hyödyntävä yhteys ja se on toteutettu verkkokommutoivalla suuntaajatekniikalla. Viipurin linkki on Back-to-back -yhteys ja sillä on neljä tyristorisiltaa rinnakkain, joista yksi on varayksikkönä. Yhteydessä käytetty tasajännite on 85 kV. Siirtoteho jokaisella suuntaajasillalla on 350 MW. 330 kV ja 400 kV kiskostoihin on asennettu ylipäästösuodattimet. Muuntajat ovat nelikäämisiä kolmivaiheisia ja sen ansiosta suodatinparistot on voitu yhdistää muuntajakäämityksen yhteyteen. Vain yhdensuuntaiseen tehon siirtämiseen pystytään tällä linkillä, koska se on ajateltu vain sähkön tuomiseen Venäjältä ja säätöjärjestelmä ei osaa kääntää tehon suuntaa. Kahdensuuntaisen siirron mahdollistavaksi säätöjärjestelmäksi kääntämistä selvitettiin vuonna 2009. (Elovaara ja Haarla 2011, 306.)

Vuoden 1985 aikainen Viipurin tasasähkömuuttaja-aseman rakennekaavio on esitetty kuviossa 58. (Laiho ja Elovaara 2001, 347-348.)



KUVIO 58. Viipurin muuttaja-aseman rakennekaavio. (Laiho ja Elovaara 2001.)

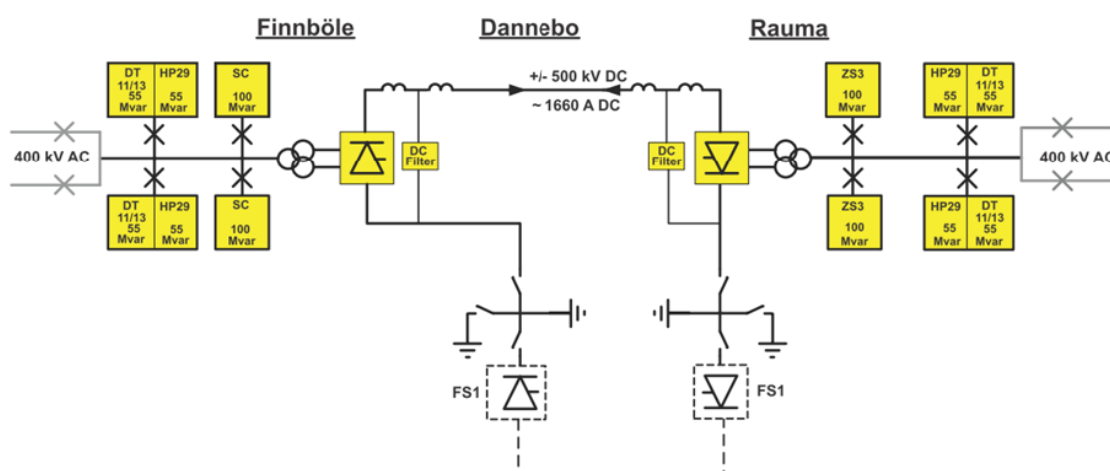
Vuonna 2006 käyttöönotettiin Suomen ja Viron välinen tasasähköyhteys EstLink. Sen tasajännite on ± 150 kV ja teho 350 MW. Yhteys on jännitelähdesuuntaajalla ja tasasähkömuovikaapelilla toteutettu. Se yhdistää pohjoismaiden ja Baltian sähköverkot. Tehoa sillä pystytään siirtämään kumpaankin suuntaan ja suurvian aikana Viron päässä pystytään antamaan jännite pimeään sähköverkkoon. Tasasähköyhteys EstLink 2 tulee olemaan verkkokommutoiva yhteys. (Elovaara ja Haarla 2011, 307.)

On selvitetty, että Viron ja Suomen välille on tarpeen toinenkin tasasähköyhteys. Tämä yhteys on nimeltään EstLink 2 ja se tulisi nostamaan Suomen ja Viron välisen tehon siirtokapasiteetin 1000 MW:n. EstLink 2:n teho olisi 650 MW ja jännite ± 450 kV. Yhteyden kokonaismatka olisi 170 km, joka on osaksi avokaapelia, osaksi merikaapelia ja osittain maakaapelia. Päätös investoida yhteyteen on tehty 19.5.2010 ja selvitykset rakentamista varten on valmiit. Arvioiden mukaan yhteyttä päästään testaamaan alkaen syksystä 2013 ja se valmistuisi kaupallisesti käyttöön vuoden 2014 puolella. Kuviossa 59 EstLink -yhteydet Viron ja Suomen välillä. (Fingrid 2010.)



KUVIO 59. EstLink 1 ja 2

Etelä-Suomen ja Etelä-Ruotsin verkot yhdistettiin vuonna 1989 Fenno-Skan 1 -yhteydellä. Tasasähköyhteyden jännite on 400 kV ja teho 550 MW. Fenno-Skan 1 on verkkokommutoivalla tekniikalla rakennettu ja käyttää monopolaarista yhteyttä. Paluureittinä virralle käytetään merta ja maata. Tehoa pystytään siirtämään kumpaankin suuntaan. Käytetty kaapeli suuntaaja-asemien välillä on 200 km pituinen paperieristeinen öljykyllästemerikaapeli. Yhteys on toiminnassa pohjoisten vaihtosähköllä toimivien yhdistävien johtojen rinnalla. Yhteys on tarkoitus laajentaa bipolaariseksi toisella johtimella ja suuntaajanavalla (Fenno-Skan 2). (Elovaara ja Haarla 2011, 306.)



KUVIO 60. Fenno-Skan 1 ja 2. (Fingrid 2011.)

40 % siirtokapasiteetin kasvu saadaan aikaiseksi Fenno-Skan 2 -yhteydellä. Se on 800 MW:n tehoinen tasasähköllä toimiva yhteys Suomen ja Ruotsin välillä. Yhteydellä saadaan kasvatettua käyttövarmuutta, markkinat saadaan yhdistettyä paremmin ja se pienentää alueellisia sähkön hintaeroja, sekä häviöitä. Fenno-Skan 2 -yhteydellä on joitakin erikoissäätöjä. Näitä ovat mm. taajuuden automaattinen säätö, vaimennussäätö alisynkronisille värähtelyille, vaimennussäätö sähkömekaanisiin heilahteluihin ja hätätehonsäätö. Ennen yhteyden käyttöönottoa yhteyttä on koeteltu tarkoin. Testeillä haluttiin varmistaa yhteyden toimiminen poikkeustilanteissa ja normaalitilassa. Tehon

siirtämisen maksimi ja suunnan vaihtaminen on varmistettu myös kokeilla. Kuviossa 60 Fenno-Skan -yhteyksien muodostama bipolaariyhteys. (Fingrid 2011, 32-35.)



KUVIO 61. Fenno-Skan 1 ja 2. (Fingrid 2011b.)

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia HVDC-laitteistoja ja siihen liittyviä ilmiöitä. Raportointiosasta laadin tutkielman opetusmateriaaliksi koululle ja kaikille aiheesta kiinnostuneille. Suomenkielinen materiaali aiheesta on suppea ja suuri osa aiheen teknisestä materiaalista olikin englanninkielistä. Teknisten termien ja asioiden kääntäminen onkin ollut suurin työ. Työn aiheessa erityisesti itseäni askarrutti loistehon ja yliaaltojen syntyminen tyristorisillalla. Työn edetessä sain vastaukset kysymyksiini ja paljon muutakin ajankohtaista tietoa aiheeseen liittyen. Valitsin aiheen mielenkiinnostani tasasuuntaukseen yleisesti. Tasasuuntauksen sovellutuksia näkeekin lähes kaikissa arkipäivän laitteissa (tasajännitevirtalähteet). Teollisuudessa sovellutus nähdään erityisesti taajuusmuuttajissa. Näkymättömämpi ilmiö on yliaaltojen aiheuttamat häiriöt sähköverkkoon ja langattomiin laitteisiin.

HVDC-laitteistot ovat kehittyneet huimasti viimeisinä vuosikymmeninä ja kilpailu on kovaa laitteistojen valmistajien kesken. Nämä laitteistot ovatkin käytännössä ainoa keino yhdistää eri verkkoja ja lisäksi näillä laitteistoilla voidaan siirrettävää tehoa säätää suhteellisen helposti. Jännitelähdesuuntaajatekniikka on tuore tasasuuntaustapa, mutta on vain 2000-luvulta lähtien käytössä olleena kehittynyt merkittävästi siirtohäviöiden pienentämisessä. Edelleen tyristorisilloilla päästään paljon suurempiin tehoihin, mutta transistorit tulevat varmasti vielä kehittymään. Tyristoreita on kuitenkin tutkittu ja kehitetty kymmeniä vuosia kauemmin.

Jännitelähdesuuntaajatekniikan suureksi eduksi näkisin sen riippumattomuuden vaihtosähköverkosta. Toisin sanoen se on itsekommutoiva. loistehon kulutusta tai tuottoa voidaan vapaasti säätää. Suuntaaja-aseman laitteisto vie tilaa karkeasti ottaen puolet verkkokommutoivaan suuntaajaan nähden. Esimerkiksi kaukana maalta olevien merituulivoimapuistojen liittäminen vaihtosähköverkkoon olisi todennäköisesti kannattavinta toteuttaa jännitelähdesuuntaajatekniikalla nykyään.

LÄHTEET

ABB CCC - Capasitor Commatated Converters. ABB. 25. Marraskuu 2008.

[http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/473830f2bc25e54ac125750c004ede16/\\$file/CCC%20-%20Capacitor%20Commutated%20Converters.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/473830f2bc25e54ac125750c004ede16/$file/CCC%20-%20Capacitor%20Commutated%20Converters.pdf) (haettu 7. Maaliskuuta 2013).

ABB ETT vs LTT. ABB. 22. Huhtikuuta 2005.

[http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/3c981b9078f55447c1256feb0022602a/\\$file/ETT%20vs%20LTT.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/3c981b9078f55447c1256feb0022602a/$file/ETT%20vs%20LTT.pdf) (haettu 7. Maaliskuuta 2013).

ABB HVDC Technology And Smart grid. ABB. 15. Tammikuuta 2013.

[http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/7fac66d81be557c0c1257af4003be06f/\\$file/HVDC%20Technology%20and%20smart%20grid.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/7fac66d81be557c0c1257af4003be06f/$file/HVDC%20Technology%20and%20smart%20grid.pdf) (haettu 7. Maaliskuuta 2013).

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K., Palva, V. Suurjännitetekniikka.

Jyväskylä: Otatieto Oy, 2003.

Arrillaga, Jos. High Voltage Direct Current Transmission 2nd Edition. Lontoo: The Institution of Electrical Engineers, 1998.

Elovaara, Jarmo, ja Liisa Haarla. Sähköverkot 1. Helsinki: Otatieto Oy, 2011.

Fingrid - EstLink 2. Fingrid. 20. Toukokuuta 2010.

<http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/hankkeet/rajayhteydet/estlink2toinentasasa hkoyhteys/Sivut/default.aspx> (haettu 2. Huhtikuuta 2013).

Fingrid - kantaverkko ja käyttövarmuus. Fingrid. 25. Marraskuuta 2011.

http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/ajankohtaista%20liitteet/yrityslehdet/2011/fingrid_3_2011.pdf (haettu 2. Huhtikuuta 2013).

Kantaverkko kehitty Fenno-Skan 2 -tasasähköyhteys. Fingrid. 1. Heinäkuuta 2011b.

http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/Ajankohtaista%20liitteet/Esitteet/Triotton%200soitteilla/fennoskan_esite_suomi_low.pdf (haettu 28. Huhtikuuta 2013).

Laiho, Yrjö, ja Jarmo Elovaara. SÄHKÖLAITOSTEKNIIKAN PERUSTEET. Helsinki: Valopaino Oy, 2001.

Li, Jingqiang. High Voltage Direct Current Transmission. 14. Heinäkuuta 2008.

<https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/1139/urn012946.pdf?sequence=1> (haettu 2. Helmikuuta 2013).

Mörsky, J. & Mörsky J. Voimalaitosten Yhteiskäytön Tekniikka. Helsinki: Otatieto, 1994.

Niiranen, Jouko. Tehoelektroniikan komponentit. Helsinki: Hakapaino, 1998.

Partanen, Jarmo. Noppa.lut.fi. 29. Marraskuuta 2011.

<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0600/luennot/tasasahkovoimansiirto.pdf> (haettu 6. Maaliskuuta 2013).

High Voltage Direct Current transmission. Siemens AG. 9. Elokuuta 2011b.

http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC_Plus_Basic%20and%20Principals.pdf (haettu 4. Maaliskuuta 2013).

HVDC PLUS. Siemens AG. 9. Elokuuta 2011.

http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC_Proven_Technology.pdf (haettu 4. Maaliskuuta 2013).